

運動障害をもつ子どもに対するリハビリテーション： システムアプローチとしてのニューロリハビリテーションへ向けて

浅野 大喜 日本バプテスト病院リハビリテーション科

連絡先：〒606-8273 京都府京都市左京区北白川山ノ元町47 E-mail: rinto.sou@gmail.com

要旨

運動障害を主症状とする脳性麻痺児や発達性協調運動障害をもつ子どもに対するリハビリテーションは、これまで運動発達理論や学習理論の影響を受けながら、時代とともに変化してきている。しかしながら、小児リハビリテーションの現場では未獲得な運動や苦手な運動技能に対して、その目標となる動作を反復練習するといった単純な介入に留まっているのが実状である。本稿では、運動制御を脳の機能から運動感覚システムとして捉え、介入していくことの必要性について示した。

1. はじめに

新生児医療の進歩に伴い、在胎37週未満で出生する早産児や、出生体重1,500g未満で出生する極低出生体重児、また1,000g未満で出生する超低出生体重児の日本における出生率は増加傾向にある^[1,2]。早産児は、発達に伴い認知発達^[3,4]や実行機能^[5,6]に問題をもつことが多く、在胎週数が小さいほど学童期には特別支援教育が必要となる割合が高くなることが知られている^[7,8]。また早産の影響は、認知能力だけでなく運動機能にも現れる。その結果、神経学的異常が明確な脳性麻痺(Cerebral Palsy; CP)から神経筋の異常が特定できず運動麻痺がないにもかかわらず協調的な運動が困難な発達性協調運動障害(Developmental Coordination Disorder; DCD)といった多様な運動障害を呈する。これらの運動障害を呈する子どもに対するリハビリテーションは、現在その効果が明確に示されているものはほとんどなく、さまざまな方法が存在し混沌としているような印象を受ける。

本稿では、CPやDCDなどの運動障害をもつ子どもに対するリハビリテーション介入について、その脳機能や学習といった観点から考察し、その具体的な介入方法

と今後のニューロリハビリテーションへの展開について述べたい。

2. 運動障害を呈する病態(CPとDCD)

脳性麻痺は、分娩時の問題によって起こる低酸素性虚血性脳症によるものや、脳室周囲白質軟化症(Periventricular Leukomalacia; PVL)によるものが多い。特にPVLは早産児特有の中枢神経障害で、おもに脳室周囲の深部白質の壊死性病変によって皮質脊髄路(corticospinal tract; CST)が損傷され、痙性両麻痺や痙性四肢麻痺を引き起こす^[9]。またPVLは、運動障害だけでなく視覚認知障害や感覚、知覚の問題、問題行動、社会的コミュニケーションの問題など日常生活において多彩な問題が生じることが知られている^[10-13]。

一方、発達性協調運動障害(DCD)は、知的障害や視覚障害、運動に影響を与える神経学的疾患では説明できない協調運動の困難さを呈する状態である。ディスプラキシア(dyspraxia)とよばれることもある^[14]。DCDの子どもは、手の巧緻動作のみに問題をもつケース、バランスなど全身の粗大運動のみに問題をもつケース、その両方をもつケースがある。DCDのサブタイプを明らかにしようとする試みはあるが、困難な領域や程度の個人差が大きくまだ確立されていない^[15,16]。

PVLによるCPとDCDの違いは、MRIによる画像診断や神経学的異常の有無が決定的となるが、独歩が可能な軽度の脳性麻痺(GMFCSレベルI)の場合、脳のマクロな構造異常が脳画像上に明確に表れないケースは20%以上あるといわれており^[17]、さらにCPとDCDは類似したリスクファクターをもつことから、この2つが連続体である可能性を指摘する研究者もいる^[18-19]。最近では、拡散テンソル画像(DTI)を用いたtractographyなどの手法によって脳の白質のミクロな構造が可視化できるよう

になった。DCDを対象としたDTI研究において、DCDと診断された早産児は、DCDのない早産児や正常産児と比べて白質脊髄路の拡散異方性(fractional anisotropy; FA)の値が減少していることが報告されている^[20]。このようにミクロなレベルで脳の構造をみた際にもCPとDCDには共通点があり、定型発達からDCD、CPへと脳構造、運動能力ともにスペクトラムに分布することが示唆される^[21]。

3. 運動障害をもつ子どもに対する運動トレーニングの限界

これまでCPを中心とした運動障害をもつ子どもに対するリハビリテーションは、中枢神経系の階層理論を基礎においたアプローチから、システム理論と学習理論を応用したアプローチへとパラダイムの転換が提案され、システム理論を背景とした課題指向型アプローチ(task-oriented training)が推奨されている^[22]。つまり、運動を妨げている異常な要素(神経学的陰性兆候や陽性兆候)の解消をリハビリテーションの目的とし、それらが改善されればパフォーマンスも改善するであろうと仮説立てられて実施されていた要素還元的なアプローチから、日常生活で困難となっている行為、運動課題に対し、目標を明確にしたうえで環境を考慮し、課題の難易度、運動量の設定を行い、反復することによって運動パフォーマンスを向上させようとするアプローチへの転換である^[23]。CP児に対する課題指向型トレーニングとして、上肢機能に対してはCI療法、下肢機能に対してトレッドミルトレーニングなどがあげられる。しかしながら、現時点において明確な効果が示されているのは、片麻痺児の上肢に対するCI療法、bimanual trainingのみであり^[24]、トレッドミルトレーニングの効果については明確に示されていない^[25]。またトレッドミルトレーニングと同様に、下肢の筋力トレーニングの効果についても限定的にしか示されておらず^[26-28]、これらの介入は、歩行可能なCP児の歩行スピードなど歩行のパラメータを変化させる可能性はあるものの、異常な歩容や非効率的な歩行パターンの修正や、まだ未獲得の運動スキルを学習させることはできないであろう。実際、CP児の非効率的な歩行パターンは、距離をどれだけ歩いても、また何年経過しても変化がないことは既知の事実である。結果的に、運動障害をもつ子どもに対するリハビリテーションの現場では、目標とする動作に着目し、実生活環境を想定した動作練習の反復で留まっていることが多いように思われる。

4. CP、DCDにおける知覚・認知障害

運動障害を主症状とするCPやDCDであるが、実は知覚、認知にも問題をもつことが、これまで多く報告されている。たとえば、PVLによる片麻痺や両麻痺を呈するCP児は、二点識別覚や固有受容感覚(関節位置覚や運動覚)による知覚や認知に困難さを呈する。興味深いことにこれらの知覚・認知障害は麻痺肢だけでなく、非麻痺肢にも存在することが明らかとなっている^[29-31]。このことから、PVL児の体性感覚による知覚・認知障害は、単なる感覚障害ではなく、情報処理過程の問題であることが示唆される。Wingertら(2010)は、麻痺の軽度な両麻痺児が運動を伴わず受動的に手で形状を識別する課題を実施しているときの脳活動を、fMRIを用いて計測し定型発達児と比較したところ、体性感覚野だけでなく頭頂間溝領域、上頭頂小葉、さらに運動関連領域の活動低下を報告している^[32]。またLeeらは、PVL児は一次運動野と一次体性感覚野、上頭頂小葉との結合に問題があることを報告した^[33]。以上より、運動を制御していくための感覚情報の活用とその学習過程に問題が生じていることが考えられる。実際、CP児の知覚・認知障害の程度と運動機能との間に関係があることが多くの研究によって示されている^[34-36]。DCDについても、視空間認知、運動感覚(kinesthetic perception)、視覚と固有受容感覚のマッチングなどのクロスモーダルな情報処理の問題が多く指摘されている^[37-39]。このようにDCDにおいても外部環境の知覚情報と身体運動感覚との統合に問題があることが示唆されている^[40]。

5. 運動制御における知覚の重要性

近年、胎児が手で自己身体に触れるという経験を通して手の運動を制御し学習していることが明らかにされてきている^[41,42]。このときに利用されている情報は、運動感覚と手と顔の接触情報であり、その知覚情報によって自己身体内での行為の企画、修正を可能にしている。これは後に、運動を企画し実行する行為機能(praxis)の発達の基盤となる身体図式の発達にとって重要になると考えられる。そして出生後、外受容感覚である視覚、聴覚で捉えられる外部空間と身体との相互作用がはじまる。

外部環境についての情報を得ることと自己身体について知ることは、行為を実行する過程では表裏一体の経験構造をなしている。つまり、行為のなかで身体をコントロールするときにはさまざまな知覚情報に依存している。たとえば、私たちが姿勢を保持しバランスを維持するためには、視覚、前庭感覚、触覚や固有受容感覚から得られる情報に依存しており、環境設定や状況に応じて

その重み付け(sensory reweighting)をしている^[43,45]。また上肢の活動において、手でリーチして対象物を掴み操作する場合には、まず視覚が対象物の位置情報だけでなく、形や大きさなど掴むために必要な情報を提供しそれによって pre-shaping や手のローテーションのような運動プランニングがなされ、固有受容感覚は現在の身体状況を把握し、目標物に対して方向や距離などを合わせて正確にリーチするために必要となる。いったん対象物に触れると、手指の触覚や固有受容感覚情報が物体の手触りや大きさなどの対象物の特徴だけでなく、操作する手指の細かな動きを制御するための身体情報を提供する。このようにさまざまな知覚情報によって、運動のプランニングや修正が可能となる。その過程では前頭-頭頂ネットワークが重要な役割を果たしており、外部環境を眼球中心座標で捉えた後、身体中心座標、運動情報へと変換していく過程ともいえる^[46-48]。われわれがそのような行為を意識せずとも容易に遂行できるのは、外部情報と運動感覚がすでに統合されているからである。

6. CP、DCD 児の運動制御におけるシステムの変容

CP 当事者にとって、ある行為を行おうとしたときに目にみえる形として現れた特異的な運動は、その時点での環境との相互作用によって試行錯誤した結果であり、システムとしての創発の結果とすることができる。また、その経験が積み重なることによって誤学習が起こり、定型発達とは異なる形でシステムの安定化を招いている可能性がある。前述したように、運動障害をもつ子どもは、筋出力だけでなく求心性の入力情報との統合に問題をもつことから、運動感覚をもとにした運動出力の調節、修正ができずに、運動の調節を外部から得られるフィードバック情報(たとえば視覚)に頼って依存していく結果、運動主体感(sense of agency)などの身体性の把握にも影響を及ぼす。Ritterband-Rosenbaum ら^[49]は、痙性両麻痺児の上肢を用いた課題において、自分の運動の結果を正しく認識する能力が劣っていることを示し、運動主体感が変容している可能性について言及している。

CP 児や DCD 児は固有受容感覚などの体性感覚を基盤とした運動制御が困難なために、運動、行為の結果つまりフィードバックを外受容感覚である視覚情報に依存した運動制御となりやすい。これは DCD 児の病態仮説として注目されている「内部モデル障害(internal modeling deficit)仮説」^[50]と一致する。CP 児や DCD 児が視覚に依存した運動制御となることはこれまでさまざまな運動課題において示されている^[34,51-54]。たとえば、DCD 児は立位バランス時のライトタッチ効果(指先を軽く触れ

ることで得られる姿勢の安定化)が得られにくいことが示されている^[55,56]。最近、ライトタッチ効果には、後部頭頂葉が関与していることが分かってきており^[57,58]、指先から得られる身体の空間的な位置情報の活用には困難がある可能性がある。結果的に、視覚フィードバックに依存しやすい CP、DCD 児は、運動感覚つまり運動表象が内部モデルとして定着しにくく、運動学習の困難さや学習した運動を他の環境でも活用し般化していく能力に問題を残すことになる。おそらく CP、DCD 児と定型発達児との決定的な違いは、その般化能力にあると考えられる^[59,60]。

また自閉症スペクトラム障害(Autism Spectrum Disorder)も運動の問題をもつことが多いが、ASD 児は CP、DCD 児とは対照的に、視覚よりも固有受容感覚などの運動感覚に依存する傾向があることが示されている^[61-63]。Haswell ら^[64]は、固有受容感覚への依存の度合いが強いほど社会性の問題が大きく、模倣能力が低いことを報告している。すなわち、ASD 児は自己の運動感覚に依存しすぎるために、それによって起こる視覚情報との結びつけに困難が生じ、それが運動の困難さのみならず、社会的関係性の問題にもつながっていることが示唆される。いずれの病態の場合でも、課題遂行のために感覚情報の重み付けを状況に応じて柔軟に変化させること、そして運動感覚と外受容感覚との統合に問題があることは同様である(図1)。

7. 運動制御における身体表象・運動表象の重要性

ここまで見てきたように、CP、DCD 児の運動機能や知覚能力の問題は、運動学習の問題につながる。運動学習については、強化学習(reinforcement learning)、教師あり学習(supervised learning)、教師なし学習(unsupervised learning)の3つの学習様式が提唱されており、運動学習の過程ではこれらが複合的に行われる^[65]。教師なし学習は、脳内ネットワークの統計的性質に依存した学習戦略であるが、ある程度の繰り返しが必要であると考えられ、この繰り返しを維持するためにも課題への意欲や能動的な学習意図をもって取り組む必要がある。乳児が、手で探索運動を繰り返して徐々にリーチング運動が正確になっていく場合、物体への探索意欲や外部からの賞賛などによって動機づけられ、探索が達成された場合には強化され、さらなる探索意欲へと拡大していく。また探索行動を試行錯誤的に繰り返す過程では、運動の結果起こる感覚の予測信号が遠心性に出力され(遠心性コピー)、結果のフィードバック情報との比較照合により、運動の修正がなされ精緻化していく。さらにそれが

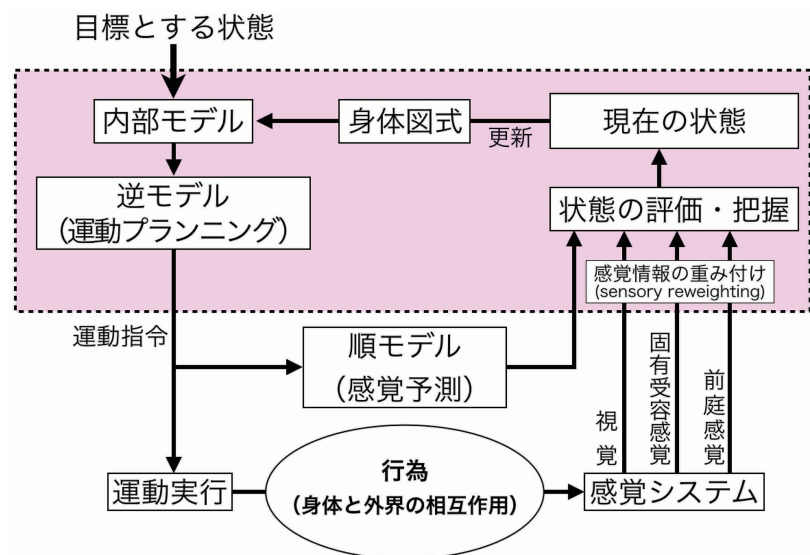


図1 運動制御プロセスと運動感覚統合

目標に対して内部モデルをもとにした運動プランニングが行われ運動が実行される。その際、運動によって起こる感覚予測がなされ、実際感覚フィードバックと比較照合・評価されることによって身体内情報である運動感覚と外部からの知覚情報が統合される。それが身体図式を作り上げ、その都度更新される。点線内が、運動と感覚の統合の領域を示す。(Gowen & Hamilton (2012)^[66]の Fig.1をもとに筆者が改変し作成)

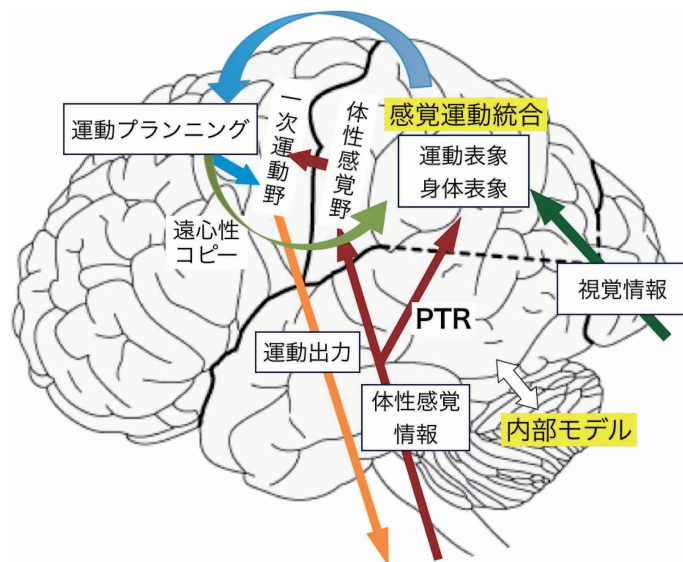


図2 運動制御における前頭-頭頂ネットワーク

視覚情報と体性感覚情報の統合によって身体表象、運動表象が作られ、それをもとに運動がプランニングされる。CP児、DCD児ともに運動出力経路である皮質脊髄路だけでなく、感覚入力経路である後視床脚(PTR)の異常が指摘されている。

記憶化されることによって内部モデルが形成され、フィードバック制御からフィードフォワード制御へと移行していく。これらの運動学習を可能にしている神経基盤が、小脳や前頭-頭頂ネットワークである(図2)。

道具などさまざまな対象物を操作したり、外部環境の変化に適応的に反応していくためには、運動のプランニングが重要となる。そして運動イメージの活用が運動スキル学習を促進することが明らかとなっている^[66,67]。内部モデル障害仮説では、DCDの運動障害の原因は、運動と感覚を統合し正確な内部モデルを形成することや運

動プランニングのために内部モデルを活用することの問題とされる。これまで、CP、DCD児において運動イメージの困難さや運動プランニングの問題が明らかにされている。近年、運動イメージの問題は頭頂連合野や前頭-頭頂ネットワークの損傷と関係があることが示されており^[68,69]、Kraeutnerら^[70]は、下頭頂小葉への経頭蓋磁気刺激(TMS)によって運動イメージを利用したスキル獲得が阻害されることを報告している。また身体図式の神経基盤は頭頂連合野の下頭頂小葉であることが示されている^[71,72]ことから、運動表象や身体表象が運動プランニ

ングに重要な役割を果たしていると考えられる(図2)。また、重度の運動障害を呈するCP児・者は、自分の身体イメージや自己身体能力の認識が欠如または変容していることが考えられ、運動のプランニング以前に身体知覚や身体所有感、運動主体感などの身体性の知覚に焦点を当てた介入が必要となろう。興味深いことにHoonら^[73]は、運動の出力経路である皮質脊髄路ではなく、視床から皮質への求心性感覚経路である後視床脚 (posterior thalamic radiation : PTR) と筋出力や移動能力との間に相関関係があったことを報告しており、頭頂葉への求心性情報の問題が運動表象や身体表象の形成不全へとつながり、運動出力や運動能力に影響を与えていることが示唆される(図2)。

8. ニューロリハビリテーションの試み

身体運動の反復を用いたリハビリテーションの限界を克服するためにニューロサイエンスの知見を応用したリハビリテーション、いわゆるニューロリハビリテーションの試みがなされるようになってきた。運動イメージを応用した介入、運動学習に焦点を当てた課題指向型トレーニング、運動観察学習トレーニングなどがこれに相当すると思われる。

DCD に対しては、運動の困難さが強いほど運動イメージの自発的な活用が困難であるが、教示により運動イメージの活用が可能であること^[74]から、運動イメージを利用したトレーニングの効果が報告されている^[75,76]。またCP児に対しては、運動イメージの障害だけでなく運動プランニングの問題も大きい(実は運動イメージとは対照的にDCDの運動プランニングの問題を示した研究は意外に少ない)ことから、他者の行為を観察しそれと平行して練習することで、ミラーニューロンシステムを活性化し、模倣によって学習を促進する試みがなされている^[77,78]。運動イメージや運動観察を利用したトレーニングは、まだ獲得していない運動スキルを試行錯誤的に繰り返すことでボトムアップ的に学習させるのではなく、目標とするスキルを想像的に取り込み、実際の運動との比較照合によって修正していくというトップダウン的学習ということが出来る。これまで効果が大きいとされている介入方法はみな単純に運動を行なって感覚を入力するというものではなく、運動と知覚の整合性や運動感覚を学習させていくというプロセスを含んだものであり、それが運動学習プロセスそのものを活性化させ、さまざまな環境下への応用、一般化へとつなげていくことを意識したものである^[79,81]。

9. PVL と診断された CP ハイリスク乳児に対する身体知覚に着目した介入

筆者はこれまで身体知覚、身体表象の発達不全が運動発達に影響を与え、経験依存的な脳の可塑的变化を阻害する可能性があるとして仮説立て、リハビリテーションの臨床に取り組んできた。たとえば重度脳性四肢麻痺児の過剰な筋緊張に対するダブルタッチを利用したアプローチや痙性両麻痺児の身体知覚や身体イメージを学習することで歩行獲得を目指すアプローチなどである^[82,83]。この基盤にはこれまでの発達科学の知見によってわかってきた身体表象の発達過程がある(図3)^[84]。

本稿では、PVL と診断された乳児に対する身体表象の発達に着目することによって、運動障害による運動発達システムの変容を防ぎ、運動発達を促進させるためのアプローチとその結果について簡単ではあるが紹介したい。

9.1 対象と介入方法

対象は、新生児期のMRIでPVLと診断され上肢に明らかな麻痺のない乳児8名(表1)。一般的にPVLによって痙性両麻痺をもつCP児は、成長の過程で上肢優位の活動となり、下肢への注意や知覚、身体表象の発達不全、学習性不使用といった状態になりやすいため、出生後早期より下肢に視覚的に注意を向けさせて遊ぶことを通して、運動と随伴的に得られる視覚、聴覚、体性感覚フィードバックの統合から下肢の身体表象の獲得、足部の空間的コントロールを学習させた。これは、過去の下肢に対する介入の目的となることが多かった体重の“支持機能”、移動のための“推進機能”とは異なる“空間でのコントロール機能”に着目したものであり、定型発達児において、体重支持や移動を獲得する以前の早期に足部の空間的コントロールが可能になるという先行研究^[85]に基づくものである。また足部の動きに伴う骨盤帯や体幹の姿勢制御についても同時に学習させるため、発達レベルに合わせて姿勢制御の難易度を変化させながら実施した(図4)。

9.2 結果

両下肢を突っ張るようなはさみ肢位とよばれる下肢の伸展内転緊張や坐位時の下肢への放散的な筋緊張が入る症例があったが、下肢での遊びがスキルアップしてくるにつれて消失した(図5)。結果的に、8例中7名が修正月齢24ヵ月以内に独歩を獲得できた。残りの1名は3歳でクラッチ歩行を獲得した。7名の運動発達評価 Alberta Infant Motor Scale (AIMS)の経過と定型発達児、早産児の標準データとの比較を図6に示す。

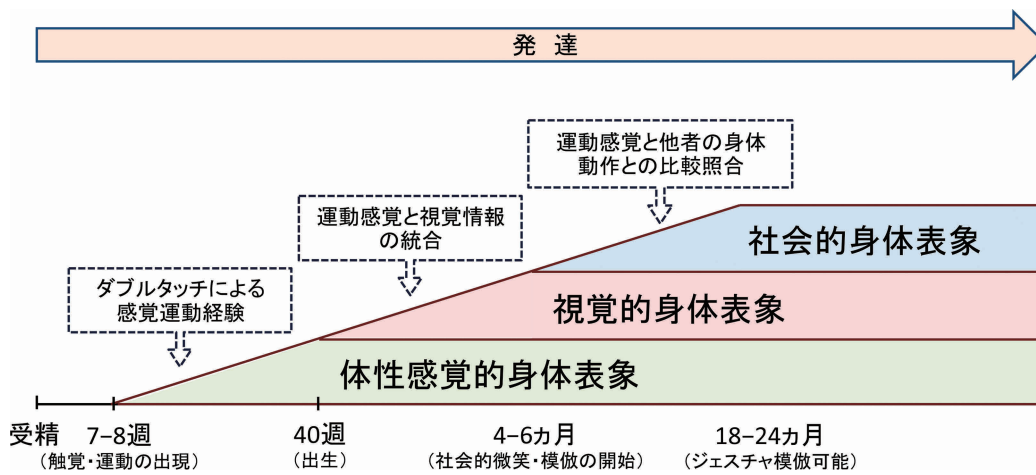


図3 身体表象の発達過程

胎児期に自己身体どうしの接触や子宮壁との接触を繰り返すことによって体性感覚的身体表象(身体図式)が形成され、出生後に視覚などの外受容感覚と統合されることによって視覚的身体表象(身体イメージ)が作られる。その後、他者との模倣を通したやりとり経験によって社会的身体表象が形成される。(身体図式、身体イメージの概念については、Gallagher (1995)^[87]、de Vignemont (2010)^[88]に準拠)

表1 対象となったPVL児

症例	性別	出生体重	出生週数	Apgar score	cyst (preterm)	PVL grade	外来リハ開始	独歩獲得時期	2歳時の診断
case A	女	1,978g	34W 4d	9/9	+	IV	1ヵ月	修正 22ヵ月	両麻痺
case B	男	1,930g	33W 0d	2/5	+	III	1ヵ月	修正 16ヵ月	両麻痺
case C	女	1,880g	32W 0d	6/9	-	II	4ヵ月	修正 18ヵ月	両麻痺
case D	男	1,482g	30W 2d	2/8	-	IV	8ヵ月	修正 17ヵ月	両麻痺
case E	男	1,662g	31W 6d	5/8	-	II	1ヵ月	修正 16ヵ月	未確定
case F	男	1,450g	31W 6d	6/7	-	II	1ヵ月	修正 18ヵ月	未確定
case G	男	1,218g	32W 1d	8/9	+	III	1ヵ月	修正 24ヵ月	片麻痺
case H	男	1,078g	38W 2d	7/9	-	IV	1ヵ月	未獲得	両麻痺

PVL grade は、Serdaroglu et al. (2004)^[89] のグレードを使用。PVL grade I : 片側または両側の高信号域が1~3カ所、II : 高信号域が3カ所より多い、III : 側脳室壁の不整を伴い高信号域が3カ所以上、IV : 脳室拡大を伴ったPVL。



図4 身体表象の発達に着目したPVL児に対する予防的介入

視覚的に注意を向けながら運動とそのフィードバックの対応関係を学習し運動を修正、コントロールすることを学び、運動主体感、自己効力感とともに身体イメージを養っていく。

(写真の掲載については、両親から同意を得ている。目線については、視覚的注意の指標である視線が重要であるため、了解を得たうえで掲載させていただいた)

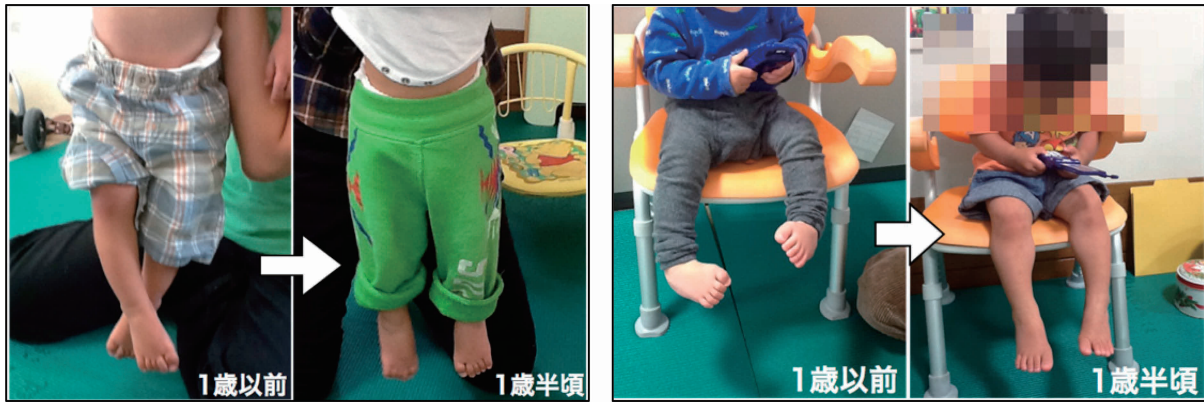


図5 介入による変化(左：はさみ肢位の消失、右：過剰な筋緊張の消失)

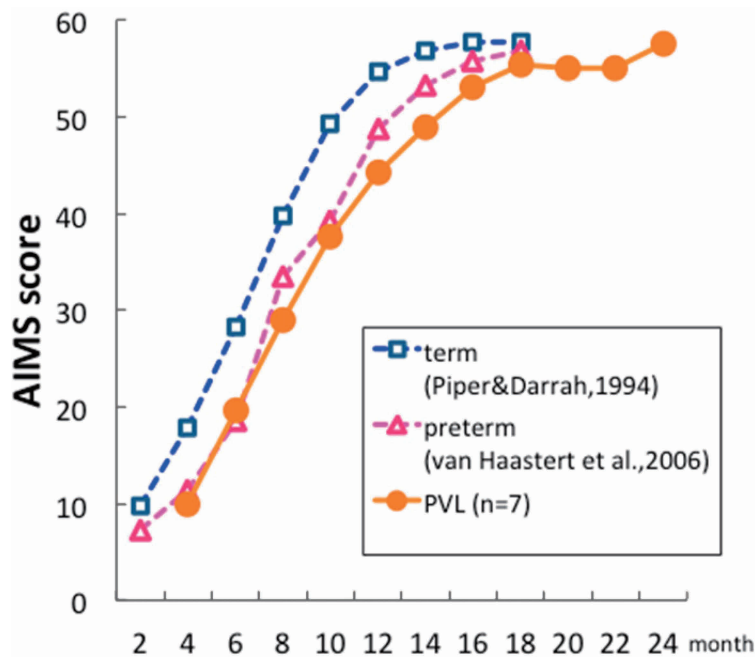


図6 早期介入を実施したPVL児のAIMS総合点(平均)の推移

10. まとめ

外部環境のなかで協調して動くためには、外部の情報と自己身体からの情報の統合が欠かせない。そして感覚と運動の統合とは、すなわち身体図式、身体イメージ、運動イメージといった身体表象・運動表象の形成にほかならない。運動障害をもつ子どものリハビリテーションは、感覚・知覚と運動のどちらかを重視した介入ではなく、感覚と運動の統合プロセスや学習プロセスにおいて起こっている問題点を個別に抽出し、介入していく必要がある。

本稿で示した介入の結果は、まだ症例報告レベルであり、効果については今後の検証が必要であるが、CPやDCDといった運動障害をもつハイリスク児に対して、出生後早期から予防的に介入していく必要性を強調するものである。これらの介入場面は一見すると足で遊ぶだけのように見受けられるかもしれないが、実際PVLを

呈する子どもにとって足部を自由にコントロールすることは、定型発達児のように容易ではない。また、子どもにとっては“遊び”であっても、治療者にとっては学習を念頭においた目的をもった介入であることが重要である。

寝返りや這い這い移動、歩行などの基本動作から、自転車の操作、道具使用、書字などに至るまで、通常であれば動作を繰り返すなかで、身体表象をもとに運動をプランニングし、修正し、内部モデルを形成しながら、さまざまな状況においてそれを応用し、意識せずとも効率よく獲得していく。しかしながら、CP、DCD児では単純に動作を繰り返すボトムアップ式の練習では限界があり、学習の基盤となる身体表象の修正、獲得のために適切な経験と学習の道筋を他者が協同して教えていく必要があると思われる。

謝辞

本論文の執筆にあたり、有益な助言をいただきました畿央大学ニューロリハビリテーション研究センターの森岡周教授、信迫悟志特任助教の両先生、ならびに論文掲載を快く承諾してくださいましたお子様とご両親に深く感謝いたします。

《文献》

- [1] 上谷良行：周産期医療の現状. *チャイルドヘルス* 12, 620-624 (2009).
- [2] 木原秀樹, 中野尚子：早産・低出生体重児のより良い発達を支援するために. *ベビーサイエンス* 9, 2-14 (2009).
- [3] Marlow, N., Wolke, D., Bracewell, M. A., & Samara, M. : Neurologic and developmental disability at six years of age after extremely preterm birth. *New England Journal of Medicine* 352, 9-19 (2005)
- [4] Jaekel, J., Baumann, N., & Wolke, D. : Effects of gestational age at birth on cognitive performance : a function of cognitive workload demands. *PLoS One* 8, e65219 (2013).
- [5] Anderson, P. J., & Doyle, L. W. : Executive functioning in school-aged children who were born very preterm or with extremely low birth weight in the 1990s. *Pediatrics* 114, 50-57 (2004).
- [6] Aarnoudse-Moens, C. S., Smidts, D. P., Oosterlaan, J., Duivenvoorden, H. J., & Weisglas-Kuperus, N. : Executive function in very preterm children at early school age. *Journal of Abnormal Child Psychology* 37, 981-993 (2009).
- [7] 上谷良行：超低出生体重児の予後. *小児科診療* 4, 549-553 (2007).
- [8] MacKay, D. F., Smith, G. C., Dobbie, R., & Pell, J. P. : Gestational age at delivery and special educational need : retrospective cohort study of 407,503 schoolchildren. *PLoS Med* 7, e1000289 (2010).
- [9] 高嶋幸男, 吉田大記, 松籐まゆみ：超早期産児から正期産児における大脳白質障害の病理. *日本未熟児新生児学会雑誌* 27, 43-49 (2015).
- [10] Fazzi, E., Bova, S., Giovenzana, A., Signorini, S., Uggetti, C., & Bianchi, P. : Cognitive visual dysfunctions in preterm children with periventricular leukomalacia. *Developmental Medicine & Child Neurology* 51, 974-981 (2009).
- [11] Pavlova, M. A., & Krägeloh-Mann, I. : Limitations on the developing preterm brain : impact of periventricular white matter lesions on brain connectivity and cognition. *Brain* 136, 998-1011 (2013).
- [12] Zubiaurre-Elorza, L., Soria-Pastor, S., Junque, C., Sala-Llonch, R., Segarra, D., Bargallo, N., & Marcaya, A. : Cortical thickness and behavior abnormalities in children born preterm. *PLoS One* 7, e42148 (2012).
- [13] 浅野大喜 & 森岡周：脳室周囲白質軟化症および知的障害児の行動特徴. *理学療法学* 43, 361-367 (2016).
- [14] Gibbs, J., Appleton, J., & Appleton, R. : Dyspraxia or developmental coordination disorder? Unraveling the enigma. *Archives of Disease in Childhood* 92, 534-539 (2007).
- [15] Vaivre-Douret, L., Lalanne, C., Ingster-Moati, I., Boddaert, N., Cabrol, D., Dufier, J. L., & Falissard, B. : Subtypes of developmental coordination disorder : research on their nature and etiology. *Developmental Neuropsychology* 36, 614-643 (2011).
- [16] Green, D., Chambers, M. E., & Sugden, D. A. : Does subtype of developmental coordination disorder count : Is there a differential effect on outcome following intervention? *Human Movement Science* 27, 363-382 (2008).
- [17] Benini, R., Dagenais, L., Shevell, M. I., & Registre de la Paralyse Cérébrale au Québec (Quebec Cerebral Palsy Registry) Consortium. : Normal imaging in patients with cerebral palsy : what does it tell us? *The Journal of Pediatrics* 162, 369-374 (2013).
- [18] Williams, J., Hyde, C., & Spittle, A. : Developmental coordination disorder and cerebral palsy : Is there a continuum? *Current Developmental Disorders Reports* 1, 118-124 (2014).
- [19] Pearsall-Jones, J. G., Piek, J. P., & Levy, F. : Developmental Coordination Disorder and cerebral palsy : Categories or a continuum? *Human Movement Science* 29, 787-798 (2010).
- [20] de Kieviet, J. F., Pouwels, P. J., Lafeber, H. N., Vermeulen, R. J., van Elburg, R. M., & Oosterlaan, J. : A crucial role of altered fractional anisotropy in motor problems of very preterm children. *European journal of Paediatric Neurology* 18, 126-133 (2014).
- [21] Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R., & Boyd, L. A. : Developmental coordination disorder : a

- pilot diffusion tensor imaging study. *Pediatric Neurology* 46(3), 162-167 (2012).
- [22] Ketelaar, M. : 脳性まひ児と両親のための機能的治療アプローチ. (三輪書店, 東京, 2004).
- [23] 潮見泰蔵 : 脳卒中患者に対する課題指向型トレーニング. (文光堂, 東京, 2015).
- [24] Novak, I., McIntyre, S., Morgan, C., Campbell, L., Dark, L., Morton, N., ... & Goldsmith, S. : A systematic review of interventions for children with cerebral palsy : state of the evidence. *Developmental Medicine & Child Neurology* 55, 885-910 (2013).
- [25] Mutlu, A., Krosschell, K., & Spira, D. G. : Treadmill training with partial body - weight support in children with cerebral palsy : a systematic review. *Developmental Medicine & Child Neurology* 51, 268-275 (2009).
- [26] Scianni, A., Butler, J. M., Ada, L., & Teixeira-Salmela, L. F. : Muscle strengthening is not effective in children and adolescents with cerebral palsy : a systematic review. *Australian Journal of Physiotherapy* 55, 81-87 (2009).
- [27] Anttila, H., Autti-Rämö, I., Suoranta, J., Mäkelä, M., & Malmivaara, A. : Effectiveness of physical therapy interventions for children with cerebral palsy : a systematic review. *BMC Pediatrics* 8, 1 (2008).
- [28] Scholtes, V. A., Becher, J. G., Janssen-Potten, Y. J., Dekkers, H., Smallenbroek, L., & Dallmeijer, A. J. : Effectiveness of functional progressive resistance exercise training on walking ability in children with cerebral palsy : a randomized controlled trial. *Research in Developmental Disabilities* 33, 181-188 (2012).
- [29] Cooper, J., Majnemer, A., Rosenblatt, B., & Birnbaum, R. : The determination of sensory deficits in children with hemiplegic cerebral palsy. *Journal of Child Neurology* 10, 300-309 (1995).
- [30] Wingert, J. R., Burton, H., Sinclair, R. J., Brunstrom, J. E., & Damiano, D. L. : Tactile sensory abilities in cerebral palsy : deficits in roughness and object discrimination. *Developmental Medicine & Child Neurology* 50, 832-838 (2008).
- [31] Wingert, J. R., Burton, H., Sinclair, R. J., Brunstrom, J. E., & Damiano, D. L. : Joint-position sense and kinesthesia in cerebral palsy. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 90, 447-453 (2009).
- [32] Wingert, J. R., Sinclair, R. J., Dixit, S., Damiano, D. L., & Burton, H. : Somatosensory - evoked cortical activity in spastic diplegic cerebral palsy. *Human Brain Mapping* 31, 1772-1785 (2010).
- [33] Lee, J. D., Park, H. J., Park, E. S., Oh, M. K., Park, B., Rha, D. W., & Kim, D. G. : Motor pathway injury in patients with periventricular leucomalacia and spastic diplegia. *Brain* 134, 1199-1210 (2011).
- [34] Krumlinde - Sundholm, L., & Eliasson, A. C. : Comparing tests of tactile sensibility : aspects relevant to testing children with spastic hemiplegia. *Developmental Medicine & Child Neurology* 44, 604-612 (2002).
- [35] Arnould, C., Penta, M., & Thonnard, J. L. : Hand impairments and their relationship with manual ability in children with cerebral palsy. *Journal of Rehabilitation Medicine* 39, 708-714 (2008).
- [36] Auld, M. L., Boyd, R. N., Moseley, G. L., Ware, R. S., & Johnston, L. M. : Impact of tactile dysfunction on upper-limb motor performance in children with unilateral cerebral palsy. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 93, 696-702 (2012).
- [37] Wilson, P. H., & McKenzie, B. E. : Information processing deficits associated with developmental coordination disorder : A meta - analysis of research findings. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 39, 829-840 (1998).
- [38] Schoemaker, M. M., van der Wees, M., Flapper, B., Verheij-Jansen, N., Scholten-Jaegers, S., & Geuze, R. H. : Perceptual skills of children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science* 20, 111-133 (2001).
- [39] Smyth, M. M., & Mason, U. C. : Planning and execution of action in children with and without developmental coordination disorder. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 38, 1023-1037 (1997).
- [40] Gomez, A., & Sirigu, A. : Developmental coordination disorder : core sensori-motor deficits, neurobiology and etiology. *Neuropsychologia* 79, 272-287 (2015).
- [41] Zoia, S., Blason, L., D'Ottavio, G., Bulgheroni, M., Pezzetta, E., Scabar, A., & Castiello, U. : Evidence of early development of action planning in the human foetus : a kinematic study. *Experimental*

- Brain Research 176, 217–226 (2007).
- [42] Zoia, S., Blason, L., D'Ottavio, G., Biancotto, M., Bulgheroni, M., & Castiello, U. : The development of upper limb movements : from fetal to post-natal life. *Plos One* 8, e80876 (2013).
- [43] Assländer, L., & Peterka, R. J. : Sensory reweighting dynamics in human postural control. *Journal of Neurophysiology* 111, 1852–1864 (2014).
- [44] Pasma, J. H., Boonstra, T. A., Campfens, S. F., Schouten, A. C., & Van der Kooij, H. : Sensory reweighting of proprioceptive information of the left and right leg during human balance control. *Journal of Neurophysiology* 108, 1138–1148 (2012).
- [45] Rinaldi, N. M., Polastri, P. F., & Barela, J. A. : Age-related changes in postural control sensory reweighting. *Neuroscience letters* 467, 225–229 (2009).
- [46] Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. : Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience* 3, 1212–1217 (2000).
- [47] Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. : Motor prediction. *Current Biology*, 11, R729–R732 (2001).
- [48] Buneo, C. A., Jarvis, M. R., Batista, A. P., & Andersen, R. A. (2002). Direct visuomotor transformations for reaching. *Nature* 416, 632–636.
- [49] Ritterband-Rosenbaum, A., Christensen, M. S., Kliim-Due, M., Petersen, L. Z., Rasmussen, B., & Nielsen, J. B. : Altered sense of Agency in children with spastic cerebral palsy. *BMC Neurology* 11, 1 (2011).
- [50] Adams, I. L., Lust, J. M., Wilson, P. H., & Steenbergen, B. : Compromised motor control in children with DCD : a deficit in the internal model? —A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Review* 47, 225–244 (2014).
- [51] Barela, J. A., Focks, G. M. J., Hilgeholt, T., Barela, A. M., Carvalho, R. D. P., & Savelsbergh, G. J. : Perception-action and adaptation in postural control of children and adolescents with cerebral palsy. *Research in Developmental Disabilities* 32, 2075–2083 (2011).
- [52] Saavedra, S., Woollacott, M., & van Donkelaar, P. : Head stability during quiet sitting in children with cerebral palsy : effect of vision and trunk support. *Experimental Brain Research* 201, 13–23 (2010).
- [53] Biancotto, M., Skabar, A., Bulgheroni, M., Carrozzi, M., & Zoia, S. : Neuromotor deficits in developmental coordination disorder : Evidence from a reach-to-grasp task. *Research in Developmental Disabilities* 32, 1293–1300 (2011).
- [54] Tsai, C. L., Wu, S. K., & Huang, C. H. : Static balance in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science* 27, 142–153. (2008)
- [55] Bair, W. N., Barela, J. A., Whittall, J., Jeka, J. J., & Clark, J. E. : Children with developmental coordination disorder benefit from using vision in combination with touch information for quiet standing. *Gait & Posture* 34, 183–190 (2011).
- [56] Bair, W. N., Kiemel, T., Jeka, J. J., & Clark, J. E. : Development of multisensory reweighting is impaired for quiet stance control in children with developmental coordination disorder (DCD). *PloS One* 7, e40932 (2012).
- [57] Ishigaki, T., Ueta, K., Imai, R., & Morioka, S. : EEG frequency analysis of cortical brain activities induced by effect of light touch. *Experimental Brain Research* 234, 1429–1440 (2016).
- [58] Ishigaki, T., Imai, R., & Morioka, S. : Cathodal transcranial direct current stimulation of the posterior parietal cortex reduces steady-state postural stability during the effect of light touch. *NeuroReport* 27, 1050–1055 (2016).
- [59] Latash, M. L., & Anson, J. G. : What are “normal movements” in atypical populations? *Behavioral and Brain Sciences* 19, 55–68 (1996).
- [60] Latash, M. L., & Anson, J. G. : Synergies in health and disease : relations to adaptive changes in motor coordination. *Physical Therapy* 86, 1151–1160 (2006).
- [61] Izawa, J., Pekny, S. E., Marko, M. K., Haswell, C. C., Shadmehr, R., & Mostofsky, S. H. : Motor Learning Relies on Integrated Sensory Inputs in ADHD, but Over - Selectively on Proprioception in Autism Spectrum Conditions. *Autism Research* 5, 124–136 (2012).
- [62] Cascio, C. J., Foss-Feig, J. H., Burnette, C. P., Heacock, J. L., & Cosby, A. A. : The rubber hand illusion in children with autism spectrum disorders : delayed influence of combined tactile and visual input on proprioception. *Autism* 16, 406–419 (2012).
- [63] Greenfield, K., Ropar, D., Smith, A. D., Carey, M.,

- & Newport, R. : Visuo-tactile integration in autism : atypical temporal binding may underlie greater reliance on proprioceptive information. *Molecular Autism* 6, 1 (2015).
- [64] Haswell, C. C., Izawa, J., Dowell, L. R., Mostofsky, S. H., & Shadmehr, R. : Representation of internal models of action in the autistic brain. *Nature Neuroscience* 12, 970-972 (2009).
- [65] 森岡周 : リハビリテーションのための神経生物学入門. (協同医書出版社, 東京, 2013).
- [66] Zimmermann-Schlatter, A., Schuster, C., Puhan, M. A., Siekierka, E., & Steurer, J. : Efficacy of motor imagery in post-stroke rehabilitation : a systematic review. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* 5, 1 (2008).
- [67] Kraeutner, S. N., MacKenzie, L. A., Westwood, D. A., & Boe, S. G. : Characterizing skill acquisition through motor imagery with no prior physical practice. *Journal of Experimental Psychology* 42, 257-265 (2016).
- [68] McInnes, K., Friesen, C., & Boe, S. : Specific brain lesions impair explicit motor imagery ability : a systematic review of the evidence. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 97, 478-489 (2016).
- [69] Oostra, K. M., Van Bladel, A., Vanhoonacker, A. C., & Vingerhoets, G. : Damage to Fronto-Parietal Networks Impairs Motor Imagery Ability after Stroke : A Voxel-Based Lesion Symptom Mapping Study. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 10 (2016).
- [70] Kraeutner, S. N., Keeler, L. T., & Boe, S. G. : Motor imagery-based skill acquisition disrupted following rTMS of the inferior parietal lobule. *Experimental Brain Research* 234, 397-407 (2016).
- [71] Pellijeff, A., Bonilha, L., Morgan, P. S., McKenzie, K., & Jackson, S. R. : Parietal updating of limb posture : an event-related fMRI study. *Neuropsychologia* 44, 2685-2690 (2006).
- [72] Parkinson, A., Condon, L., & Jackson, S. R. : Parietal cortex coding of limb posture : in search of the body-schema. *Neuropsychologia* 48, 3228-3234 (2010).
- [73] Hoon, A. H., Stashinko, E. E., Nagae, L. M., Lin, D. D., Keller, J., Bastian, A., Campbell, M. L., Levey, E., Mori, S., & Johnston, M. V. : Sensory and motor deficits in children with cerebral palsy born preterm correlate with diffusion tensor imaging abnormalities in thalamocortical pathways. *Developmental Medicine & Child Neurology* 51, 697-704 (2009).
- [74] Williams, J., Thomas, P. R., Maruff, P., & Wilson, P. H. : The link between motor impairment level and motor imagery ability in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science* 27, 270-285 (2008).
- [75] Wilson, P. H., Thomas, P. R., & Maruff, P. : Motor imagery training ameliorates motor clumsiness in children. *Journal of Child Neurology* 17, 491-498 (2002).
- [76] Wilson, P. H., Adams, I. L., Caeyenberghs, K., Thomas, P., Smits-Engelsman, B., & Steenbergen, B. : Motor imagery training enhances motor skill in children with DCD : A replication study. *Research in Developmental Disabilities* 57, 54-62 (2016).
- [77] Sgandurra, G., Ferrari, A., Cossu, G., Guzzetta, A., Fogassi, L., & Cioni, G. : Randomized trial of observation and execution of upper extremity actions versus action alone in children with unilateral cerebral palsy. *Neurorehabilitation and Neural Repair* 27, 808-815 (2013).
- [78] Buccino, G., Arisi, D., Gough, P., Aprile, D., Ferri, C., Serotti, L., ... & Fazzi, E. : Improving upper limb motor functions through action observation treatment : a pilot study in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology* 54, 822-828 (2012).
- [79] Smits-Engelsman, B. C. M., Blank, R., Van der Kaay, A.C., Van der Meijs, R. M., Van den Brand, E.V., Polatajko, H.J., & Wilson, P.H. : Efficacy of interventions to improve motor performance in children with developmental coordination disorder : a combined systematic review and meta-analysis. *Developmental Medicine & Child Neurology* 55, 229-237 (2013).
- [80] Niemeijer, A.S, Smits-Engelsman, B.C.M., Schoemaker, M.M. : Neuromotor task training for children with developmental coordination disorder : a controlled trial. *Developmental Medicine & Child Neurology* 49, 406-411 (2007).
- [81] Ryalls, B. O., Harbourne, R., Kelly-Vance, L., Wickstrom, J., Stergiou, N., & Kyvelidou, A. : A Perceptual Motor Intervention Improves Play Be-

- havior in Children with Moderate to Severe Cerebral Palsy. *Frontiers in Psychology* 7 (2016).
- [82] 浅野大喜, 福澤友輝, 岩見千恵子: 後弓反張姿勢を呈する重度脳性四肢麻痺児に対するダブルタッチの効果. 日本理学療法学会大会, BbPI2133 (2011).
- [83] 浅野大喜, 森岡周: 痙性両麻痺を呈する脳性麻痺児の身体イメージに着目した治療展開と長期経過報告. 第5回日本ニューロリハビリテーション学会, 東京 (2014).
- [84] 浅野大喜: リハビリテーションのための発達科学入門. (協同医書出版社, 東京, 2012).
- [85] Galloway, J.C., & Thelen, E.: Feet first: object exploration in young infants. *Infant Behavior and Development* 27, 107-112 (2004).
- [86] Gowen, E., & Hamilton, A.: Motor abilities in autism: a review using a computational context. *Journal of autism and developmental disorders* 43, 323-344 (2013).
- [87] Gallagher, S.: Body image and body schema: A conceptual clarification. *Journal of Mind and Behavior* 7, 541-554 (1986).
- [88] De Vignemont, F.: Body schema and body image—Pros and cons. *Neuropsychologia* 48, 669-680 (2010).
- [89] Serdaroglu, G., Tekgul, H., Kitis, O., Serdaroglu, E., & Gökben, S.: Correlative value of magnetic resonance imaging for neurodevelopmental outcome in periventricular leukomalacia. *Developmental Medicine & Child Neurology* 46, 733-739 (2004).