

発達的にみたイメージ変換におけるからだの動き

野田 満*

要 約

3歳から5歳までの幼児60名に対してメンタルローテーション課題実施中の身体の動きを測定した。頭部と手から得たそれぞれの加速度の平均は無相関となり、不変分散では高い相関が得られた。またメンタルローテーション課題を適切に行った子どもは特徴的な分布を示し、より高い相関も得ることが出来た。このことから頭と手の揺れの関係はなんらかの協調 (coordination) 関係にあると考えられた。同期性とシナジー概念から、幼児の頭部と手という身体各部の動きが一定の比率へと収束していく姿について、新しい解釈を展開した。

加速度は単位時間あたりの速度の変化量を示す。よって身体の動きの加速度を測定した場合、動く早さの変化量を得ることになる。手を振った場合、その手の振り方を早くしていけば加速度はプラス方向に増大していくが、そこから振り方を緩やかにしていけば、マイナスの変化量へと転じることになる。また、一定の速度を維持して手を振り続けられれば、速度の変化が無いために加速度はゼロになる。ただし、人間が機械のように身体の動きを一定の速度に保つことは不可能に近いことである。なめらかな動きをとることは出来ても、手や腕の関節や姿勢など多くの変数が関係してくるために、一定の速度にはならない。静止した状態であれば加速度はゼロと考えられるが、人間の身体は呼吸やその他の生理的なこと等が原因して、なんらかの運動変化の中にいるといえる。つまり、人間の身体の動きを加速度で測定すると、微弱ながらも常になんらかの変化量を得られることになる。

前報 (野田, 2014) で示したように情報工学や体育学で子どもの運動を測定するために加速度計が用いられ行動の変化を捉えようとする試みがなされてきた。幼児期や児童期においては日常生活における活動性の指標として用いられることが多

く、活動量の測定に歩数計 (ライフコーダー) に内蔵された加速度のデータを利用するという方法が多く取られてきている (足立・笹山・引原・沖嶋・水内・角南・塩見・西牟田・菊永・田中・齊藤・吉武, 2007; 塩見・角南・沖嶋・吉武・足立, 2008; Tanaka, Tanaka, Kawahata, & Midorikawa, 2007)。さらに4歳児における身体活動と運動能力の関係 (鈴木, 2001) を調べたものなどがある。これらは、活動量が日によってまた年齢によってどう変化するかを明らかにしようとした研究である。また保育園内の空間でどのように行動するか、ライフコーダと位置情報の取得に用いるICタグ (RFID) とを併用して、集団活動の質的变化を捉えたものがある (今城・上坂・柴田・芳賀・金田, 2009)。多くの子どもが一斉に質的に変化するという意味で加速度による活動性の測定は有効であることが示されている (上坂・今城・柴田・芳賀・金田, 2009)。また、金田・上坂・今城・三本・新谷・糖野 (2010) が情報工学的な視点から、評価実験を行い話を集中して聞いている子どもとそうでない子どもを加速度センサーや顔情報の分析を通じて識別しようとしている。加速度の現れから話に集中していたと思われる子どもの場合はそうでない子どもに比べて、測定値が安定していたことが報告されている。さらに、「タクトを振る」という行為に限定し振りの周期性やばらつきを導

2014年11月30日受付

* 江戸川大学 人間心理学科教授 認知発達心理学

く試みもなされている（新谷・橋詰・金岩・金田, 2007）。これらのことから加速度により計測された値は注意や行動の斉一性や周期性といった発達心理学や認知心理学において重要な概念と結びつく可能性が高いことがわかる。

実際、加速度計を身体に装着した場合、身体運動の有無やその大小、また厳密には身体運動の遅速の変化として捉えられ、運動の分析に用いられている。しかし認知的な課題を通じての身体的なかわりについて、加速度の側面からまだ十分な研究が進んではいないと言える。子どもはまず動きを通じて世界を理解しようとし始めることは発達心理学の世界ではよく知られたことである（Bruner, Olver, & Greenfield, 1967/1968; Piaget, 1952/1967, 1970/2007; Werner & Kaplan, 1963/1974）。動くことで対象を取り込み身体と一体化しようとする行為は、まだ十分に発達していないレベルでの子どもの認識の仕方と考えられてきている（Bruner et al., 1967/1968; Piaget, 1970/2007）。こうした古典的な研究から、年少児の方が年長児に比べて身体の利用が多いと予想できる。先に述べたように加速度から導かれる問題は、斉一性や周期性といった身体の動きを明らかにすると考えられるが、発達心理学的な問題は斉一性や周期性における側面が年齢とともにどう変化するのかを明らかにすることと考える。こうした加速度に反映される身体の変化には、Werner & Kaplan (1963/1974) が指摘するような身体と対象とが一体化した行為から対象を内面化し表象上で捉えるようになるというプロセスが対応していくものと予想される。

筆者は、4歳から10歳までの幼児や児童に見本合わせ課題を行わせた際に、固定された刺激対象を手で動かそうとし、比較すべき刺激の上に移動させようとする特異な行為がみられたので「ひきうつし」と命名した（野田, 2001; Noda, 2010）。メンタルローテーション課題でも同じく観察されたのだが（Noda, 2010）、ひきうつしの際の手の動かし方はいくつかのパターンに分かれるが、意図的に身体を利用して対象の移動や回転変換を何もない空間上で行おうとするものであっ

た（野田, 2014b）。手が対象へかかわっていることが観察され、明示的にひきうつしと判断される場合はよいが、手の動きが観察されない場合も含まれ、その場合はカテゴリーとして「無し」と判定した。しかし、この「無し」という状況においても、身体を傾げるとか、手の僅かながらの動きが認められたのである。そこに手や腕の微振動までも含め、対象に対するなんらかの能動的な振る舞いが行われていたのではないかと解される可能性が残されていた。観察の上で明確なカテゴリーに入りきらないような動きであっても、加速度という身体の動きの変化を捉えた指標を用いれば、より詳細な子どもの側の能動的なかわりを捉えられると考えられる。

その場合、対象へのかかわりは単に手の動きだけでなく、既に観察されたように頭部の傾きも含めて身体各部分の動きにも反映してくると予想される。対象へのかかわりがスムーズであれば身体各部の動きも連動してくるであろうといえる。逆にぎくしゃくしてぎこちなければ身体各部の動きもまちまちになると予想される。つまり、対象へのかかわりにおける身体各部の状態には斉一性という概念を時間的なタイミングに限定した同期（synchronism）という問題が隠されていることに気づかされる。身体各部のそれぞれの動きのタイミングがあうかは、ある意味で発達の水準も規定してくるであろうと推測される。

ダイナミックシステムアプローチでは、運動がスムーズに行われる以前では、ぎこちなく身体各部の相互の協調あるいは協応（coordination）が充分にとられていない不安定な状態から、複雑な要因が絡んで今までとは異なる行為が現れてくることを取り上げている。例えば、乳児期に原始歩行が出来ていたにも関わらず、それが2か月頃に消失して、再び新たな組織化が進行してから歩行が現れてくるが、Thelen (Thelen & Fishe, 1982; Thelen, 1986) が示したように、実は体重増加により歩行動作が確認されなくなっただけで、体重増加に伴う身体変化にあわせて新たな歩行動作へと潜在的に発達が進行していたことを明らかにしたものである。こうした既に先行して出現し

ていたが消失してしまう行為が、再び安定した状態で顕在化するというU字型発達の背景には脳の成熟とは異なる様々な要因の相互関連による自己組織化があるとする見方が示されている (Fogel, 2008; 河合, 2008; Smith, 2006; Smith & Thelen, 2003; Thelen, 1995)。身体的な動きの不安定さから安定した状態への移行に発達の節目を見出すことが重要と思われるが、一方で、どのような状況でこの不安定さを取り出せるかということも検討しておく必要があると思われる。

その意味で、本研究では基本的にはベルンシュタイン問題を意識している。目と手の協応が出来ていない未熟な段階では思うとおりに対象を動かすことも出来ないが、身体の動きが各部分独自の動きではなく、連携した動きへと変化することで自由度が下がりスムーズな運動を発現することが出来るようになる。身体の動きは一定の精密な機械のような動きとは異なり、同じ目的を達成する動きであっても必ずしも同じ軌道上を動くとは限らない。それは多数の筋の協調 (coordination) による機能的構造の働きというシナジーの概念のより説明されている (Bernstein,1967; Sporns & Edelman,1993)。対象操作が内面化するプロセスでは実際に対象に身体的なかかわりを何度も繰り返すことにより、自由度が低減していき、各部分の連携が協調 (協応) し、対象との柔軟な操作可能な身体的なかかわりを持つようになって、対象を表象上で操作することが出来るのではないかと推測される。年少児の場合は対象への身体的なかかわりがある程度柔軟に出来るようになり、自らが対象操作を意図した通りにコントロール出来るようになることで、表象上での変換も可能となるのではないだろうか。実際、シナジーの計測が Latash, Scholz, & Schoner (2001) により試みられ、児玉・園田 (2013) により紹介されている。2本の指で押すという作業だが、その2本の指の圧力の合計を一定に保たねばならないという課題が行われた。それぞれの圧力は図1のx軸とy軸に対応する。直線はXとYの値の圧力合計が一定となるよう描かれた1次関数である (課題の圧力が10なら $F1+F2=10$, つまり $x+y=10$ とい

う直線となる)。また複雑な変数をコントロールから除外するという意味で課題限定的な UCM 仮説 (uncontrolled manifold hypothesis) での検証が試みられていて、測定値の分布から2本の指の間の協調がうまく出来ている場合は、BやCのようにUCMの直線上に集まり、シナジーを形成すると解釈され、一方で協調されずに圧力のかげかたが偏るとUCM直線から離れてしまうので (A), シナジー不形成となる。またUCMの直線状のある領域だけに圧力が偏る場合 (D) シナジーが十分に発揮されていないとされている。シナジーの強さ (R_v) はUCM直線における斜め方向の分散に対するUCMの分散比として表され、シナジーは1以上の値を取る場合に認められると想定されている。

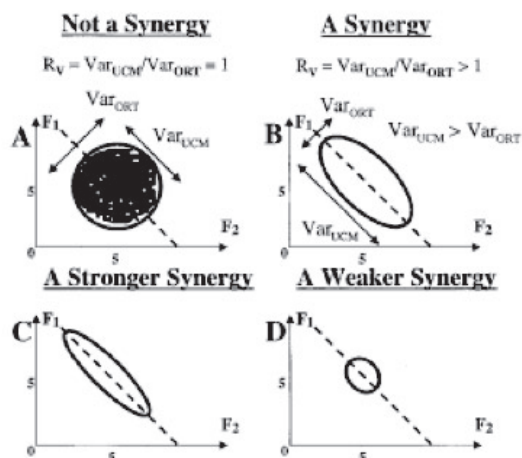


図1. Latash, Scholz, & Schoner (2001) によるシナジーのあり方

そこで本研究では、手によるひきうつしを含め身体を傾ける等の動きが確認されたメンタルローテーション課題 (野田, 2001, 2012, 2013, 2014; Noda, 2010) において、身体各部で計測した加速度の変化量のあいだになんらかの同期性が認められるのではないかとこの予想を立てた。メンタルローテーションでの身体的動きは、視覚対象とつながろうとする動きの一種という捉え方ができるので、視線方向をガイドする動きにある程度の関連のある頭部と、対象を補足し反応しようとする手の動

きとの両者の動きについて、同期という点から、特に動きの協調をシナジーの側面からも探索的に分析を試みることにした。

方 法

参加児：千葉県保育園に通う3歳児19名(3.5～4.5歳:平均4.0歳),4歳児26名(4.3～5.7歳:平均4.9歳),5歳児18名(5.6～6.6歳:平均6.2歳),計63名。

実施日時・場所：2013年10月～11月 保育園の一室に机と椅子を用意して個別に実施した。椅子の高さを調整するために、幼児用の自動車座席(リーマンジュニアII,リーマン)を装着してその上に座るようにした。また足が床につかないので、安定させるためラバー製のプレイマットを重ねて足台として用いた。

メンタルローテーション課題：傾いた刺激の異同を求める課題であるが、本研究では標準刺激と比較刺激とを同時に提示し、傾けられた比較刺激が標準刺激と同じか(正像か)異なるか(鏡映像か)を問うかたちをとった。HSP言語を用いてmsecまでの計測を行えるようにプログラムを組んだ。刺激提示のディスプレイは斜めに立て掛けることが多いが、身体的なかかわりを引き出すために机の上に水平に配置した。ディスプレイの解像度は1600×900で大きさは20inch(対角49.5cm)である。刺激対の提示はHSP言語により制御した。PCはWindowsマシン(OSはwindows7)を用いた。反応ボタンは同じと判断した場合に別に用意したテンキーの「4」、異なる場合に「6」を押すことで信号を得るようにした。その際、幼児向けに同じボタン(テンキーの4)にはプラスチックで出来た黄色のトラの顔を接着しそこに「おなじ」とラベルを表記し、異なるボタン(テンキーの6)には緑色のカエルの顔を接着し「ちがう」と表記した。これらテンキーによる反応ボタンはディスプレイの右側に置くようにした。

刺激：基準用や練習用には杖を持つ王様の刺激、本検査用には白地に黒丸の入った旗型刺激(flag)とウマに乗る子どもを描いたウマ刺激(gee)を

用意した。矩形内に図柄が描かれるが、その矩形を取り囲む形で円形枠を設けた。背景は黒である。ディスプレイ上での矩形は490×830mm,取り囲む円形枠の直径は133mmである。左側には常に同じ0度正立の標準刺激,右側には0,45,90,135,180度の傾きをもつ比較刺激を提示した。比較刺激には其々の角度について正像と鏡映像とを用意した。練習の際に用いた補助具としてアクリル製の透明のプレートに標準刺激と同じ王様の絵柄を印字し貼り付けたものを用意した。透明シートに印刷したので透けて見えるかたちになる

加速度の計測：加速度を測定するために小型無線多機能センサー(TSND121, ATR-Promotions)を用いた。x,y,z軸の加速度を測定することが出来る。重量22gで大きさが37mm(W)×46mm(H)×12mm(D)と軽量コンパクトであるために幼児の身体各部の計測に適している。また無線であるために有線のような活動範囲の制約を受けない。サンプリングレートは20ms,加速度範囲は±8Gと設定した。装着部位は手首と頭の2箇所である。右手首背側に指先がX軸,右手首内側方向がy軸となるようリストバンドを付けてその内側に接着するようにした。装置と手首とのあいだに直接的な圧を緩和するため布を入れる工夫をした。頭部の計測では幼児～少年用ヘルメット(2歳～8歳用,東方興産)を用意し,そのヘルメット後部外面に上がX軸,左方向がy軸となるよう接着した(Fig.2)。加速度の計測はメンタルローテーション課題の練習を含め本検査終了時までに行った。

映像記録：子どもの左後方と前方左側,前方中央,右後方の4方向から課題の最中の映像を記録した。TSND121にシンクロする映像入力が可能であったので,子どもの左後方からのカメラに同期させた。処理量の負荷が増大し途中で取得情報の脱落が生じないように,同期カメラはWEBカメラ1台を利用した。他は前方からのWEBカメラを別に用意したPCで記録し,右後方からのカメラは家庭用のビデオカメラ(JVC)を利用した。

手 続 き

Marmor (1975,1977) と同じく 1) 基準試行, 2) 傾き練習, 3) 本検査の順番にメンタルローテーション課題を行った。基準試行では先の王様刺激を提示するが, 2人の王様が左右同じ側の手で杖を持っているか, いないかを問うた。この基準試行では左右の理解が来ているか調べられたが, 10試行中8試行正しく出来た場合に通過者とみなした。子どもの結果に対するフィードバックは行った。傾き練習では比較刺激を 45,135,180度傾けて提示するが, それぞれの角度で正・誤の場合を練習した。練習用のプレートを標準刺激の上に置かせて杖の左右位置を確認させ, その上で比較刺激までディスプレイ上をスライドさせながら回転させ, 異同を問うた。ここでもフィードバックは行った。最初にお手本として検査者側がプレートをもち, ディスプレー上をスライドさせて確認まで行うデモンストレーションを行った。本検査は旗刺激 (flag) とウマ刺激 (gee) とをカウンターバランスをとり用いた。比較刺激の 0,45,90,135,180度および正誤についてはランダムに呈示した。各水準で2試行行った。2種類の刺激×5角度×正誤×2試行であるので本検査だけで40試行となる。初期画面で画面中央に星が3000ms呈示されてから刺激対が呈示され, 反応



図 2. 実験の状況

矢印の箇所に加速度計を装着した。頭部 (head) 装着はヘルメットにバンドで止めた。手首 (hand) はピンク色のリストバンドで装着されている。写真の提示刺激は flag で比較刺激には 90度正像の試行。

ボタンを押して刺激が消えるまで 1000ms, 再提示まで 1000ms の間隔とした。

結 果

1. メンタルローテーション課題の整理と合成加速度の算出

メンタルローテーション課題を通過できた子どもは 63 名中 60 名であった。ただし flag は 59 名で gee は 60 名となった。本検査における同試行のみを対象として反応時間 (msec) と誤反応とを整理した。メンタルローテーションの程度をみるために, 子どもごとに角度と反応時間との決定係数 (r^2) を算出した。決定係数は相関係数の二乗であるのでメンタルローテーションの指標として用いられている。勾配に対する反応時間の 1 次関数の適合度の指標である。これを利用し r^2 が .44 より大きい場合をメンタルローテーターとする基準 (Estes,1998) を用いた。

3 軸加速度センサー (TSND121) から x,y,x 軸の 3 方向での加速度成分が得られたので, これらの合成加速度を求め動きの変化量とした。合成加速度は $G = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ (m/s^2) の式から算出した。

2. 頭部と手首の加速度比較

最初に, 各幼児の身体の動きとして頭部 (head) と手首 (hand) との両方の加速度についての情報を求めた。本検査の旗型刺激 (flag) とウマ刺激 (gee) について, 幼児ごとに最初の刺激提示から最終的な反応を終えるまでの 20 試行における加速度平均と分散を求めた。分散は普遍分散を計算した。

対象になった幼児全体の特徴を得る為に, 既に求めた各参加児の加速度平均を更に平均した値を求めた (表 1)。加速度平均は動きや揺れの中央を示すが, 実験対象とした幼児における平均的な動きを示している。分散も各幼児の不偏分散を平均した値で, 揺れ幅の平均を示している。

部位や刺激の種類により加速度の値に違いがあるか検討するために, まず平均値による一元配置の分散分析を行った。主効果は有意であった

($F(3,234)=42.40, p<.001$) ので Fisher の多重比較 (LSD 法) を行ったところ, head で計測した flag ($M=10171.50$) が hand で計測した flag ($M=9869.63$) や gee ($M=9888.48$) よりも有意に高い値を示し, head で計測した gee ($M=10167.92$) が hand で計測した gee ($M=9888.48$) や flag ($M=9869.63$) よりも有意に高い値を示した ($p<.001$)。次に分散による一元配置の分散分析でも主効果は有意であった ($F(3,234)=30.24, p<.001$)。多重比較をおこなったところ, head で計測した flag ($M=142618.17$) は hand で計測した flag ($M=2263271.26$) や gee ($M=2339060.3$) よりも有意に低い値を示し, head で計測した gee ($M=149837.39$) は hand で計測した gee ($M=2339.60.26$) や flag ($M=2263271.26$) よりも有意に低い値を示した ($p<.001$)。

また, 図3には head と hand のある時間を切り取った加速度の変化を图示した。反応した子どもは年中クラスで, CA 5.7, 女児, 刺激は gee で 135 度の向きに鏡像が提示され, それに対してボタンを押したところである。横軸の単位は 20ms で縦軸が加速度 g であり, 約 4 秒間の変化を示す。下が hand, 上のグラフが head である。x,y,z 軸の値が異なるのは装置の装着位置によるものである。変化のプロセスをみるために x,y,z の値を別々に示したが, 相関等の分析処理の計算においては合成加速度にして求めている。さて, 図の下側の hand を示すグラフでは 2 回の大きな揺れが見られるが, これはシンクロさせた映像からボタンを 2 度押ししていることが判明している。その際に head の方も微弱ながら変位したことが読み取れる。動作におけるこうした関係は多

表1 加速度の統計的値

部位	刺激	平均	平均の 最大値	平均の 最小値	平均の レンジ	分散	分散の 最大値	分散の 最小値	分散の レンジ
head	flag	10171.50	10600.37	9728.46	871.91	142618.17	587294.82	14045.58	573249.24
	gee	10167.92	10585.71	9725.28	860.42	149837.39	535459.78	19866.70	515593.08
hand	flag	9869.63	10268.68	9565.66	703.01	2263271.26	9041594.65	5635.29	9035959.35
	gee	9888.48	10323.41	9570.12	753.29	2339060.26	9386135.98	15937.63	9370198.35

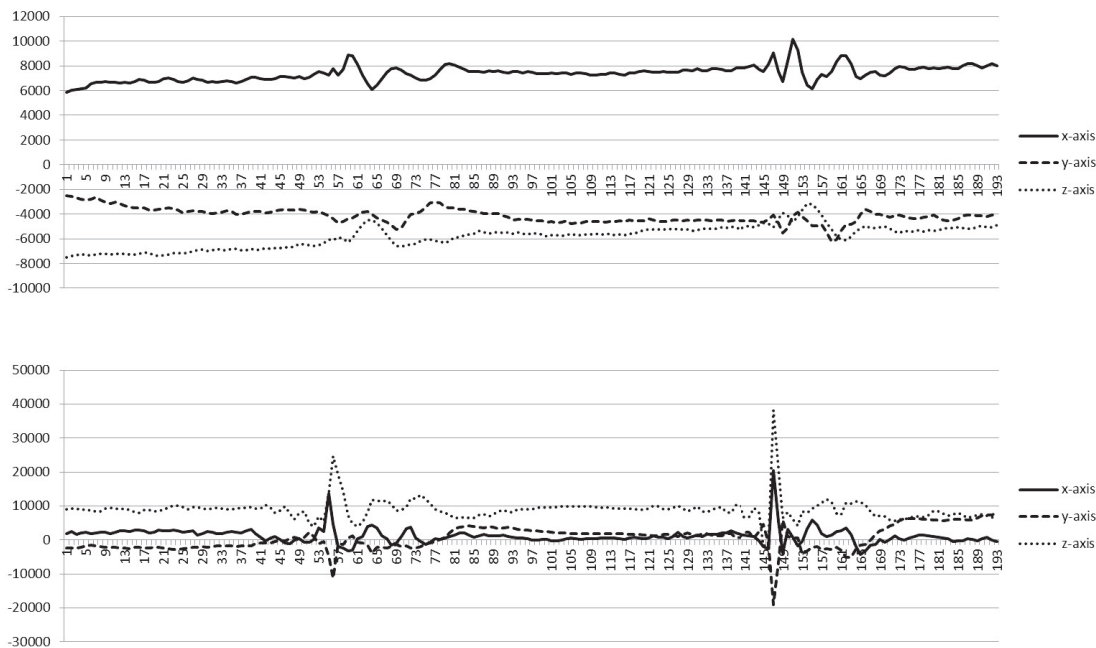


図3 頭部 (head) と手首 (hand) の加速度変化の例

く見られた。ただし hand のみ変位し head では変位が現れないという場合やその逆のように、同時変化が見られないケースも多数あった。

3. 頭部と手首との相関

身体の動きとして頭部と手首との両方の加速度についての情報を求めたが、身体各部の関連性を検討するために、頭部 (head) と手首 (hand) との相関分析を行った。加速度は動きの変化を反映する指標である。加速度平均とは動きや揺れの中央を示し、分散とは揺れ幅を示している。head に対する hand の関係から刺激ごとに一次関数を求め、得られた相関係数の無相関検定を行った。表 2 に示すように平均を指標とした場合は無相関であったが、分散を指標とすると正の相関が得られた。これらをより明確にするために図 4a ~ d に各幼児の head と hand の加速度の値をプロットした。明らかに散布の違いが示された。平均では分布が拡散しているが、不偏分散では一次関数上への収束がみられた。平均では一次関数がほぼ水平に描かれ、hand の値は変わらず head だけが変化していることが示されているが、分散の場合であると右上がりの直線となり明確な共変性が確認できる。

表 2 head と hand との相関

	刺激	一次関数	相関	無相関検定
平均	flag	$y = -0.0066x + 9936.4$	0.0070	ns
	gee	$y = -0.0548x + 10446$	0.0592	ns
不偏分散	flag	$y = 10.535x + 760798$	0.5038	$p < .001$
	gee	$y = 12.615x + 448810$	0.6107	$p < .001$

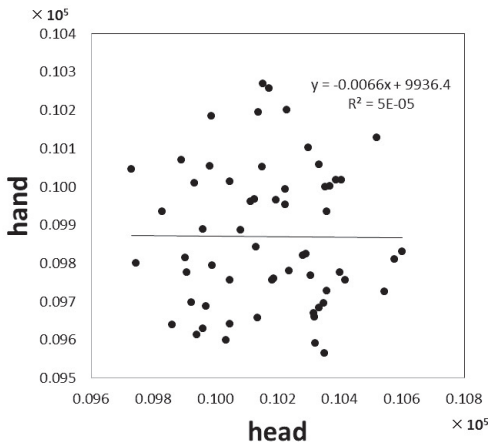


図 4a flag 刺激における平均の分布と一次関数

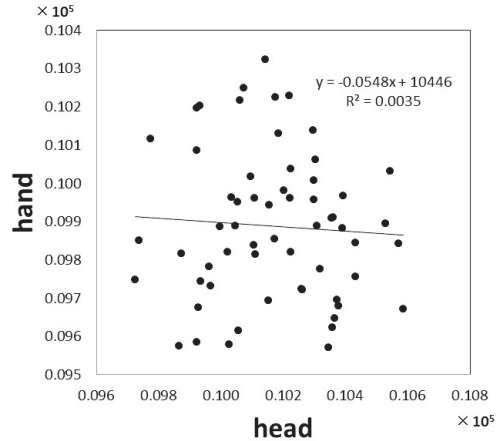


図 4b gee 刺激における平均の分布と一次関数

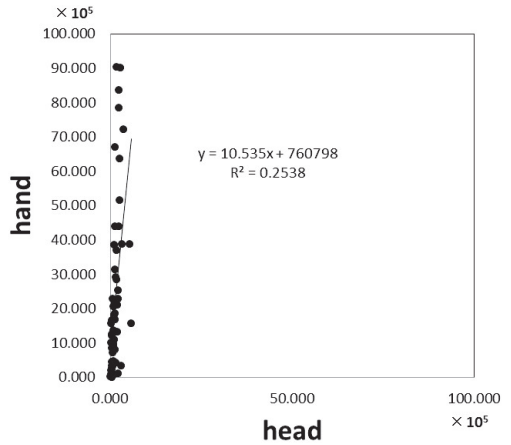


図 4c flag 刺激における不偏分散の分布と一次関数

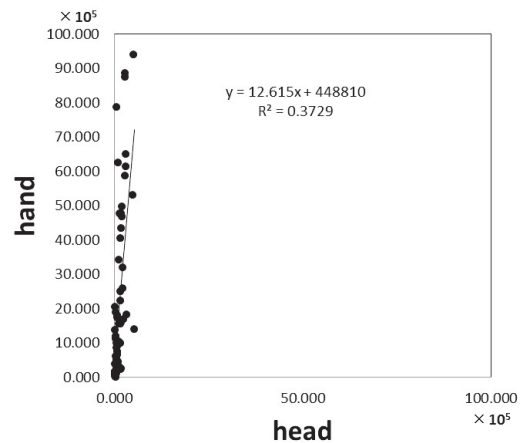


図 4d gee 刺激における不偏分散の分布と一次関数

4. メンタルローテーターの振る舞い

頭と手の動きが連関していることが不偏分散でみられたので、メンタルローテーションのスキルの高い子どもが、headとhandの分散からどのような動きをしているかを分析した。表3に示したように、flagの一次関数は $y = 23.112x - 282424$ で相関は.785と全体の子どもを対象とした場合よりも高い値を示した。一方、geeでは一次関数は $y = 8.2938x + 2 \times 10^6$ となり右上がりの関数となったが、相関は.368と無相関ではなかったものの ($p < .001$)、全体を対象にした場合よりも相関の強さはやや低くなった。プロットした図5a,bを比較するとflag, geeともに直線上に収束する傾向が強く認められた。さらに、特徴的であったのは、flagではプロットされた範囲がx軸すなわちheadの分散が比較的低い値に集中しhandでは広範囲にわたっていた。geeにおいても1名を除き、flagと同じくheadの分散が低い値に集中しhandで広範囲にわたるかたちであった。

表3 メンタルローテーターに限定したheadとhandとの相関

刺激	一次関数	相関	無相関検定
flag	$y = 23.112x - 282424$	0.7850	$p < .001$
gee	$y = 8.2938x + 2000000$	0.3678	$p < .001$

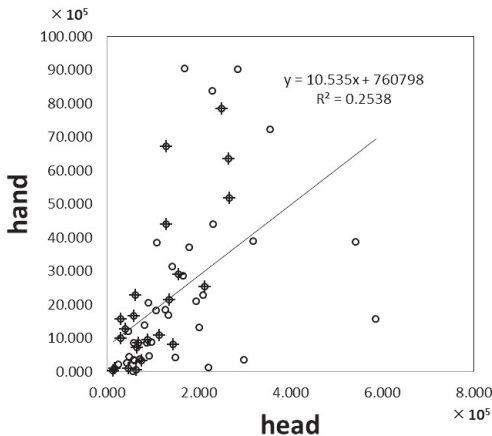


図5a メンタルローテーターの分布 (刺激は flag)
分布域がわかるように X 軸の縮尺を変えてある。十字マークがメンタルローテーターの子どもであることを示している。

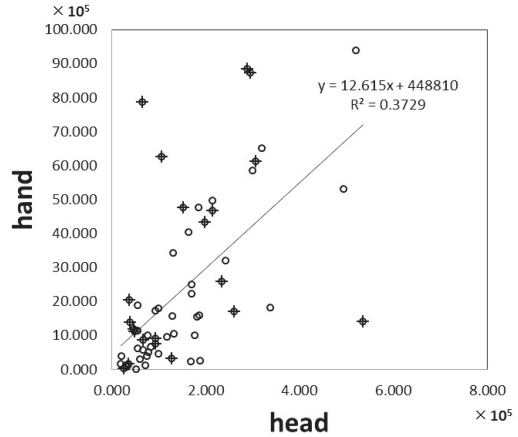


図5b メンタルローテーターの分布 (刺激は gee)
右下にプロットされた子どもを除けば flag と同じく左側に集まっている。

5. シナジー的な視点からみた頭と手の関係性

UCMのように変数を限定して関数 ($F1 + F2 =$ 一定の変数) を得たわけではないが、分布から得た1次関数 ($y = ax + b$) がある。この一次関数は頭と手の共変性を示すことから、共変は協調の程度を表しているともみなすこととした。まずデータの分析として座標の回転を行い x 軸と y 軸の分散比を求めることにした。2変量 (head と hand) について、一次関数式の y 切片を原点 (0,0) に基準化し、傾きをゼロとする一次関数 ($y = 0x$) を求めるために、以下の式から回転行列を用いて θ 度回転させた。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

回転行列の計算はエクセルで行ったが、回転後のデータは一次関数における傾きと y 切片はゼロに近似する値となった。そこで一次関数のパラメーターが少数4位から5位でゼロとなるよう再計算した上で得られた座標データを用いて不偏分散を計算するようにした。座標変換した flag, gee の分布は図6a,bに示した。こうして変換し直した flag の一次関数は $y = .0004x + .00004$, gee の一次関数は $y = .00008x + .00002$ となった。傾きを0にしたので、数値の上では headの方がhandよりも分散が大きくなっているが、x,y 軸

での比を求めることがここでの目的であるのでどちらに回転させても問題は無い。head の不偏分散 ($V_{he}=5921495081667.22$) と hand の不偏分散 ($V_{ha}=10093461473.46$) の比を求めると flag では $V_{he_flag}/V_{ha_flag}=586.67$ となった。一方, gee における head ($V_{he}=6248413912414.71$) と hand ($V_{ha}=9164944995.03$) の比を求めると $V_{he_gee}/V_{ha_gee} = 681.77$ となった。

考 察

1. 加速度により測定された身体の動きについて

加速度計 (TSND121) の装着場所によって、得られる加速度に違いが生じると考えられる。本研究では後頭部と右手首背側に装着した。メンタルローテーションのような対象イメージの空間変換が求められる認知課題を行う場合には目と手の協応が予想されたからである。加速度はそもそも動きの変化をとらえる指標として利用されたが、速度が加速する場合と減速する場合の両方に加速度変化が生じる。子どもが課題前にじっとしている状態は初期値となり、課題提示とともに身体の動きが生じ加速度変化が記録されるが、課題の区切りとともに再び身体の動きが少なくなり安定した状態に戻ってくる。安定した状態であった姿勢が崩れ不安定な揺れた状態となり、じっとしていた手は活発に動く状態へと移行する。しかし再び姿勢はもとの状態に戻り手も安定する。この繰り返しが加速度の波形記録から見て取れた (図2)。そこで課題の最中の動きを定量化するために平均と分散の2指標を用いて分析したところ、平均ではheadの方がhandより高い平均値を示し、分散は平均とは逆さにhandの方がheadより大きな値を示した。加速度平均においてheadの方がhandより高くなった理由は初期値の問題と考えられる。課題を行う前の姿勢で計測した値そのものが、既にheadの方がhandより高かった。これは装置の装着位置の違いからx,y,z軸での加速度の初期値が異なってくる影響を受けたものと考えられる。一方で、分散の違いが生じたことは動きの変化の度合いが異なることを示し、headよりhandの方が大きく揺れたことを意味している。headの揺れは少ないがhandの揺れは大きいだけでなく不規則であることがわかる。頭は比較的静止した状態であったが、手の動きは様々に変わり得るために生じたものといえる。もちろん身体を傾けるなどした子どもの場合は頭での計測も大きな揺れとして記録されるが、多くの子どもは頭を大きく動かすことなく、むしろ手の方の動

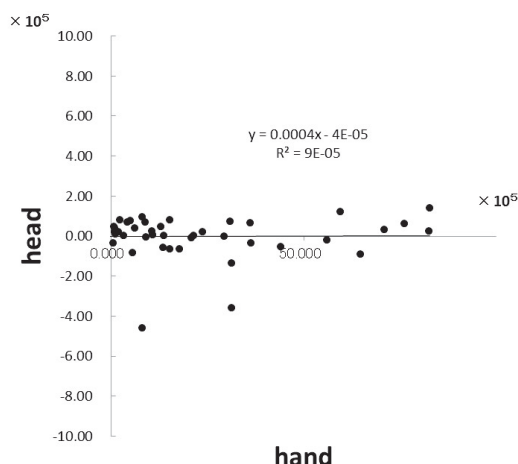


図 6a 回転させ水平成分と垂直成分がわかるようにした flag の分布図

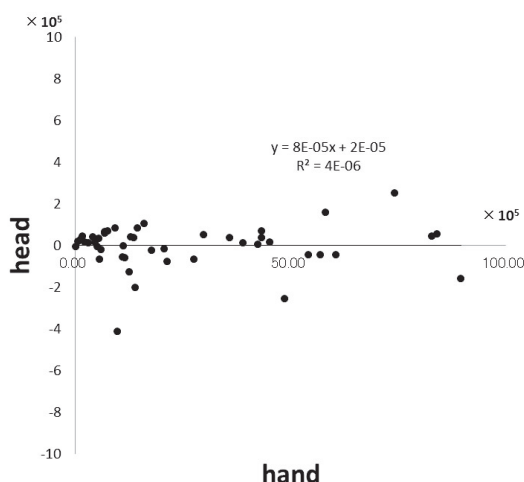


図 6b 回転させ水平成分と垂直成分がわかるようにした gee の分布図

きが大きかった。ただし、年長児の中で比較的心内で対象イメージを回転させ静かに課題を遂行していた子どもは、手も無駄な動きは無く、頭も手も動きの変化は少なかった。興味深かったのは、反応ボタンを押す手の動作で得られる加速度変化と頭のわずかな揺れによる加速度変化とがリズムカルな動きを示すことがみられたことである(図2)。おそらくイメージ変換のスキルが上がると、自然と反応する姿勢である頭と手の動きが協調するような一体化した動きが現れ、課題の構造上、一定の時間間隔で比較すべき刺激がディスプレイに呈示されるため、同期したようなりズムカルな現象が加速度計測で記録できたのではないかと考えられる。

2. 頭と手の関係について

相関分析から得られた平均の分布における拡散と不偏分散における一次関数上への収束とはさきわめて対比的な特徴を示していた(図3a~d)。平均は課題における合成加速度の平均で、減速により加速度がマイナスとなる値も正の値に修正されたものである。それ故、速度変化の平均値を意味する。速度変化の平均値は測定部位の揺れの速さの変化を示す平均値であるので、次のように言うことができる。子どもにより頭の揺れの速さの変化は手の揺れ(動き)の速さの変化と不均一である。つまり、頭の揺れの速度と手の動きの速度とは対応しておらず、それぞれに個人差があるということになる。これには姿勢も関係するかもしれない。例えば前かがみの子どもとそうでない子どもの場合であると、重力との関係からそれぞれに加速度の初期値への影響度が異なってきしまう。常に膝の上に手を置いている子どもと机の上に手を置いている子どもでもやはり異なってくる。ただそうした要因を想定しても剰余変数としての影響があるかという点、計測値の加速度平均の幅からすると誤差の範囲であることがわかる。

不偏分散は頭と手のそれぞれの揺れ幅の平均であり、平均とは異なり相関が高く、一次関数上への収束がみられた。頭の揺れ幅と手の揺れ幅との比率がいずれの子どもにおいてもほぼ同一の割合

で生じていることを意味する。これは一次関数の係数として示されていて、例えばflagであると $y = 10.535x + 760798$ の10.535がそれにあたる。つまり、頭の揺れ幅と手の揺れ幅はある特定の比率で均一となり、一次関数の係数として示されたことになる。揺れを振幅ととらえ、身体各部における揺れの周期性という側面を分析する必要性は充分にあると考えられる。

3. メンタルローテーションという変換操作での身体の動き

メンタルローテーターであった子どもは、散布図の左側の領域に集まった。つまりheadの分散は低くhandは様々な分散値をとっていた。このことはイメージの変換能力の高い子どもは頭部の揺れ幅が少なく、手の動きの幅は様々で個人差がみられたことを意味する。メンタルローテーターは決定係数から導かれたものである。対象を一定の速度で回転させられるという表象操作が幼児の中でも高い子ども達である。さらにflagでは幼児全体でのheadとhandとの分散の相関よりメンタルローテーターのみ抽出した際の分散の相関の方がより高い値となっていた。メンタルローテーション課題における認知的な操作を行うためには対象の視覚的な属性を符号化して視覚イメージを形成し、そのイメージを回転させる処理が必要とされている(Cooper & Shepard,1973; Pellegrino & Kail,1982)。イメージの形成や操作は幼児期において容易に達成できるものではなく、また全員が出来るというものでもない(Marmor,1977)。野田・落合(2014)によると、メンタルローテーションにおける決定係数と自己制御における自己抑制や注意の移行とが関連していることが見出された。自らを適切に抑制し、注意をシフトさせるという作業では、意識的に集中しないと適切に課題を達成できない側面があることから、頭部の揺れは少ない方が意識の集中に適した動きであったと推測される。メンタルローテーターによる高い相関という傾向がgeeではflagほど明確に表れなかった理由として、刺激の違いによる可能性は高いと思われる。抽象的な刺

激図形である flag はより高い識別力や分析的な力が要求されたであろうが、ウマに乗った少女の刺激図である gee は具体的で親和性があり容易に符号化しやすい、つまり意識の集中度の違いが生じたことが原因していた可能性が考えられる。

また、分散の広がりから、頭に比べて手の動きが活発であることを予想させるが、これは実際に反応させる手の方を計測していたことや、指や手を用いて刺激イメージを動かそうとする行為「ひきうつし」が頻繁に生じたこと（野田,印刷中）も原因すると考えられる。つまり、意識的な集中の為に頭の揺れが少なくなり、head と hand の揺れにおける各参加児の分布において、一次関数上の左側にメンタルローテーターが集中してプロットされたと考えられる。ただし、メンタルローテーターではない子どもの頭の揺れ幅は広範囲にわたり、揺れ幅の少ない子どももいた。それが集中によるのかそもそも動きの少ない子どもであったのか判別は難しい。

4. シナジーとの類縁性

Latash et al. (2001) の方法では他の変数を除外した課題内での身体の動きに限定して、実験自体も特別な事態を用意しておく必要があった。しかしながら、シナジーそれ自体は Bernstein(1967) が考えたように多くの筋の協調が要求されるダイナミズムを説明するもので課題の制約を設けなくとも自然に発現しているものである。その意味でイメージの変換という表象上の操作では、身体の動きを伴う場合や、身体の動きの助けにより促進されること (Frick, Daum, Walser & Mast, 2009; 野田, 2012; Wexler, Kosslyn & Berthoz, 1998) からすると、イメージ操作においては手の動きだけでなく身体の各部の協調が働いているのではないかと予想された。既に指摘したように頭の揺れと手の動き（揺れ）との相関がみられ、これが協調のある側面の表れではないかと考えられる。一次関数（回帰式）における係数が頭と手の揺れの比から成るものであった。それゆえ、協調が充分でなかったら相関は低くなると予測される。相関が高くなるということは head

と hand との揺れ幅の比率がどの子どもも一定の値に限りなく集約することを意味する。例えば、頭と手がともに大きな振幅を持つ子どもであっても、また逆に頭と手の振幅がともに小さい子どもであっても、それら振幅どうしの割合が同じであれば一定の値へ集約していくことになる。それをここでは相関という値で示している。では、一定の値への集約 (r として得られているもの) とは何か、一定の値（一次関数で示されるもの）とは何を意味するのかという問題が最後に残る。一次関数の係数は head に対する hand の揺れ方の程度を示し、切片は head と hand の揺れのずれの初期値とみなすことも出来よう。一定の値は head と hand との関係を示していると考えられる。そこで head と hand との初期値を修正し、head に対する hand の揺れの程度ではなく、分布範囲における垂直・水平成分の比を求めるために、不偏分散の分布を原点に基準化し x 軸上に分布を回転させ、 x 軸と y 軸における散らばりの比を求めてみた。現在のところ水平垂直成分の程度に有意な差を見出す術はないが、 x 軸と y 軸における散らばりの比は、flag が 586.67 で gee では 681.77 となり gee の方が横長の分布となった。それらを頭と手との協調の現れとするならば、Latash et al. (2001) のモデルからすると flag に比べて gee の方が強い協調を示したことになる。

シナジーに近似した関係を見出した可能性は色濃く残るが、今後、年齢の違いによる同期の程度の変化をも考慮に入れ、検討を続ける必要があると考える。

参考文献

- 足立 稔, 笹山健作, 引原有輝, 沖嶋今日太, 水内秀次, 角南良幸, 塩見優子, 西牟田 守, 菊永茂司, 田中宏暁, 齋藤慎一, 吉武 裕 2007 小学生の日常生活における身体活動量の評価: 二重標識水法と加速度計法による検討. 体力科学 56(3), 347-355.
- Bernstein, N.A. 1967 *The coordination and regulation of movements*. Oxford: Pergamon.
- ブルーナー, J. 1968 認識能力の成長 上・下 岡本夏木・奥野茂夫・村川紀子・清水美智子 (訳) 明治図書 (Bruner, J., Solter, R.R., & Greenfield, P.M. 1967. *Studies in Cognitive Growth*.)
- Cooper, L. A., & Shepard, R. N. 1973 Chronometric studies of the rotation of mental images. 75-176. In

- W.G.Chase(Ed.) *Visual information processing*. New York: Academic Press
- Estes,D. 1998 Young children's awareness of their mental activity: The case of mental rotation. *Child Development*, 69(5), 1345-1360.
- フォーゲル, A 2008 心理学におけるダイナミカルシステム理論 発達心理学にみるダイナミカルシステム研究 岡林春雄(編), 河合優年(訳) 金子出版 53-64.
- Frick, A., Daum, M. M., Walsler, S., & Mast, R. W. 2009 Motor processes children's mental rotation. *Journal of Cognitive and Development*, 10(1-2), 18-40.
- 今城和宏, 上坂和也, 柴田征宏, 芳賀博英2009 RFID 及び加速度センサによる子どもの交友関係の自動分析. 情報処理学会研究報告. 2009-UBI-22(4), 1-8
- 金田重郎, 上坂和也, 今城和宏, 三木貴裕, 新谷公朗, 糖野亜紀 2010 ステレオカメラと加速度センサを用いた読み聞かせに対する子どもの集中度分析手法 情報処理学会研究報告. 2010-CE-104(2), 1-8.
- 河合優年 2008 心理学におけるダイナミカルシステム理論 発達心理学とダイナミカルシステム理論 岡林春雄(編) 金子出版 65-81.
- 児玉謙太郎・園田耕平 2013 身体運動研究における "Synergy" 概念とその射程 人工知能学会第27回発表論文
- 上坂和也, 今城和宏, 柴田征宏, 芳賀博英, 金田重郎 2009 加速度に基づく集団行動の自動セグメンテーション 人工知能学会第23回発表論文集
- Latash, M. L. Scholz, J. P. & Schoner, G. 2002 Motor control strategies revealed in the structure of motor variability. *Exercise and Sport Sciences Reviews*.
- Marmor, G. S. 1975 Development of kinetic images: When does the child first represent movement in mental images? *Cognitive Psychology*, 7, 548-559.
- Marmor, G. S. 1977 Mental rotation and number conservation: Are they related? *Developmental Psychology*, 13(4), 320-325.
- 野田 満 2001 イメージの発達 菱谷晋介(編) イメージの世界 ナカニシヤ出版 233-249.
- Noda, M. 2010 Manipulative strategies prepare for mental rotation in young children. *Journal of European Developmental Psychology*, 7(6), 746-762.
- 野田 満 2012 幼児期・児童期初期におけるイメージ変換にとっての準備的要因 イメージ心理学研究 10, 23-27.
- Noda, M. 2012 Developmental change of strategies in a matching-sample task. 109-113. 15th European Conference on Developmental Psychology, *Medimond International Proceedings*
- Noda, M. 2013 Searching area using mouse pointer in mental rotation by young children. 15th European Conference on Developmental Psychology, poster.
- 野田 満 2014 幼児におけるメンタルローテーションでの準備的探索 江戸川大学紀要, 24, 21-32.
- 野田 満・落合洋子 2014 メンタルローテーションと自己制御との関連性(2) 日本教育心理学会第56回総会発表論文集
- Noda, M. 2014 Transformation of the incomplete figure in young children. *International Journal of Behavioral Development*, 38(1), 23-32.
- 野田 満 「ひきうつし」という手操作方略のイメージにおける役割 イメージ心理学研究(印刷中)
- Pellegrino, J. W., & Kail,R. 1982 Process analyses of spatial aptitude. In R. J. Sternberg. (Ed.), *Advances in the psychology of human intelligence*. vol.1 pp.311-365
- ピアジェ, J. 1967 知能の心理学 波多野完治, 滝沢武久(訳) みすず書房 (Piaget, J., 1947. *La Psychologie de l'intelligence*)
- ピアジェ, J. 2007 ピアジェに学ぶ認知発達の科学 中垣啓(訳) 北大路書房 (Piaget, J., 1970. *Piaget's theory*. In P.H.Mussen (Ed.), *Carmichael's manual of child psychology* (3rd ed.) : vol.1. New York: John Wiley & Sons.
- 新谷公朗, 橋詰和範, 金岩伸悟, 金田重郎2007 センサー情報を用いた音楽指導場面における幼児の行動分析手法の提案, 情報処理学会第69回全国大会発表論文集, 419-420.
- 塩見優子, 角南良幸, 沖嶋今日太, 吉武 裕, 足立 稔 2008 加速度計を用いた幼児の日常生活における身体活動量についての研究. 発育発達研究, 39, 1-6.
- Smith, L. B. & Thelen, E. 2003 Development as a dynamic system. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 7(8), 343-348.
- Smith 2006 Movement matters : The contributions of Ester Thelen. *Biological Theory*, 1(1), 87-89.
- Sporns, O. & Edelman, G. M. 1993 Solving Bernstein's problem : A proposal for the development of coordinated movement by selection. *Child Development*, 64, 960-981.
- 鈴木裕子 2001 4歳女児における身体活動と運動能力に関する研究 : ライフコーダを用いた身体活動量の測定評価から 名古屋柳城短期大学研究紀要, 23, 97-107.
- Tanaka, C., Tanaka, S., Kawahara, J., & Midorikawa,T. 2007 Triaxial accelerometry for assessment of physical activity in young children. *Obesity*, 15(5), 1233-1241.
- Thelen, E. 1995 Motor development. *American Psychologist*, 50(2), 79-95.
- Thelen, E., & Fisher, D. M. 1982 Newborn stepping: An explanation for a "disappearing reflex." *Developmental Psychology*, 18, 760-775.
- Thelen, E. 1986 Treadmill-elicited stepping in seven-month-old infants. *Child Development*, 57, 1498-1506.
- ウェルナー, H.・カプラン, B. 1974 シンボルの形成 柿崎祐一(監訳) ミネルヴァ書房 (Werner,H. & Kaplan, B. 1963. *Symbol formation*.)
- Wexler, M., Kosslyn, S. M., & Berthoz, A. 1998 Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.

謝辞

研究に協力くださったえどがわ森の保育園の子ども達, 落合園長先生ならびに担任の先生方に感謝いたします。本研究は JSPS 科研費 25560119 の助成を受けたものです。

英文タイトルと要約

Developmental Research of Physical Movement at Imagery Transformation

Mitsuru Noda

The head and hand movements of 60 young children between three and five years old were measured with an acceleration meter while they performed a mental rotation task. The head and hand averages were not correlated, but the unbiased variance was highly correlated. The mental rotator showed discriminative plotting, and had high correlations. From the results we concluded that there is some coordination between head and hand movement. From the perspective of synchronicity and synergy, we considered a new explanation for children's movements of each part of the body converge to the specific ratio.