

## DCD ASDの感覚運動機能の発達と支援



畿央大学ニューロリハビリテーション研究センター  
 畿央大学大学院健康科学研究科  
 信迫悟志 RPT, Ph.D.

✉ s.nobusako@kio.ac.jp

✕ @SatoshiNobusako

f satoshi.nobusako

### 神経発達症

#### (Neurodevelopmental Disorders)

発達性協調運動障害は、WHOの国際疾病分類（The International Classification of Diseases: ICD-11）における「神経発達症群」、米国精神医学会の精神疾患の診断・統計マニュアル（Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: DSM-5-TR）における「神経発達症群」に含まれる。

ICD-11		DSM-5-TR	
神経発達症群	知的発達症	神経発達症群	知的発達症群
	発達性発話または言語症群		コミュニケーション症群
	発達性学習症 (LD)		自閉スペクトラム症 (ASD)
	発達性協調運動症 (DCD)		注意欠如多動症 (ADHD)
	上記3つのうち2つ以上該当		限局性学習症 (SLD)
	自閉スペクトラム症 (ASD)		発達性協調運動症 (DCD)
	レット症候群		他の神経発達障害
	注意欠如多動症 (ADHD)		etc...
etc...			

# 発達性協調運動障害(D evelopmental C oordination D isorder: DCD)

## 診断基準と疫学

□ DSM-5-TR (アメリカ精神医学会/精神障害の診断と統計マニュアル)

項目	内容
A	協調運動技能の獲得や遂行が、その人の生活年齢や技能の学習及び使用の機会に応じて期待されるよりも明らかに劣っている。その困難さは、不器用（例：物を落とす、またはぶつかる）、運動技能（例：物を掴む、はさみや刃物をつかう、書字、自転車に乗る、スポーツに参加する）の遂行における遅さと不正確さによって明らかになる。
B	診断基準Aにおける運動技能の欠如は、生活年齢にふさわしい日常生活活動（例、自己管理、自己保全）を著明及び持続的に妨げており、学業または学校での生産性、就労前及び就労後の活動、余暇、および遊びに影響を与えている。
C	この症状の始まりは発達早期である。
D	この運動技能の欠如は、知的障害や視力障害によってうまく説明されず、運動に影響を与える神経疾患（例、脳性麻痺、筋ジストロフィー、変性疾患）によるものではない。

American Psychiatric Association. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: DSM-5-TR. Washington DC, American Psychiatric Publishing, 2022

## □ 疫学

学齢期の小児の有病率はおよそ5-8%とされる。ASD: 1-3%, ADHD: 5-7%

男女比は2対1, 4対1ないし7対1（男児に多い）。

DCDと診断された児の50-70%が青年期・成人期にも運動の不器用さが残存する。

## Gross Motor Skills 粗大運動スキル

全身的な運動



DCD：走ったり跳んだりといった全身運動(粗大運動)やスキップをしたり縄跳びをしたり楽器を演奏するなどの組み合わせ運動(構成行為)に困難が認められる。

⇒遊び、体育、スポーツ、レジャーへの参加、および仲間との社会的接触の困難に繋がる (Blank et al., 2019)

## Fine Motor Skills 微細運動スキル

主に手の運動



DCD：字を書いたり、ハサミを使ったり、ボタンを留めたりといった手先の巧緻運動(微細運動)に困難を認める。

⇒学校での活動の約半分は書字活動 (文部科学省, 2013)。学校の成績に関連している (Blank et al., 2019)

## Balance バランススキル

姿勢制御



DCD：不安定なところで姿勢を保持したり、片脚立ちになったりといったバランスに困難を認める。

⇒遊び、体育、スポーツ、レジャーへの参加、および仲間との社会的接触の困難に繋がる (Blank et al., 2019)

## 診断と疫学

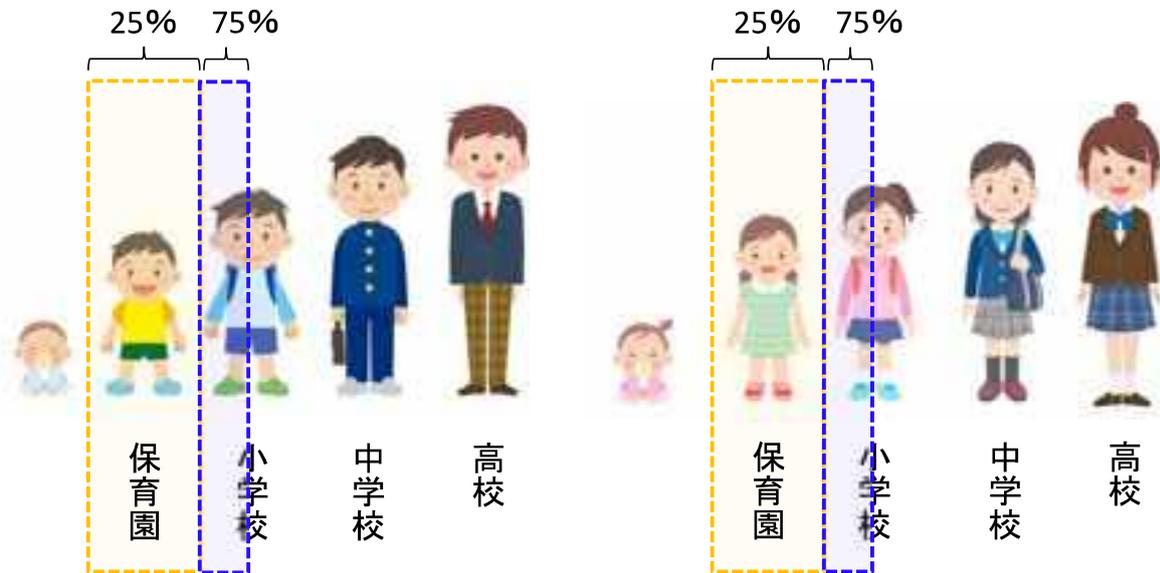
### □ DSM-5 (アメリカ精神医学会/精神障害の診断と統計マニュアル)

発達性協調運動障害(Developmental Coordination Disorder: DCD)

#### ○ この症状の始まりは発達早期である。

例えば「這(は)う」「歩く」といった乳幼児期の運動面の発達においてすでに、標準の月齢より遅れが見られる。

DCDを有する子どもの25%が小学校入学前に診断され、残りの75%は小学校の最初の数年間に診断される（欧米諸国の場合）。



## DCDは他の神経発達症と頻繁に併存する

- ASD児におけるDCD併存率は67-97%である
- ADHD児におけるDCD併存率は50%以上であり、最もDCDを併存する神経発達症である
- SLD児におけるDCD併存率は30-50%（読字障害ディスレクシア・書字障害ディスグラフィアの50%，特異的言語障害SLIの30%）である

信迫悟志, 神経発達症, PT・OTビジュアルテキスト小児理学療法第1版, 羊土社, 2023

## DCDと脳性麻痺CPは連続体!?

DCDとCPでは、類似の原因（周産期の酸素灌流の問題:周産期低酸素症）を有していたことや、CPの主な原因となる皮質脊髄路の拡散異方性（fractional anisotropy:FA値）がDCD児においても減少していたことなどから、DCDとCPは連続体（コンティニウム、スペクトラム）である可能性も指摘されている

Pearsall-Jones JG, et al. Developmental Coordination Disorder and cerebral palsy: categories or a continuum? Hum Mov Sci. 2010 Oct;29(5):787-98.

Williams J, et al. Developmental Coordination Disorder and Cerebral Palsy: Is There a Continuum?. Curr Dev Disord Rep 1, 118-124 (2014).

Hyde C, et al. Neurophysiological Approaches to Understanding Motor Control in DCD: Current Trends and Future Directions. Curr Dev Disord Rep 6, 78-86 (2019).

## 早産／低出生体重児におけるDCD発現頻度

早産児および低出生体重児では、約2：1の割合でDCDの発現頻度が高い

Blank R, Barnett AL, Cairney J, Green D, Kirby A, Polatajko H, Rosenblum S, Smits-Engelsman B, Sugden D, Wilson P, Vinçon S. International clinical practice recommendations on the definition, diagnosis, assessment, intervention, and psychosocial aspects of developmental coordination disorder. Dev Med Child Neurol. 2019 Mar;61(3):242-285.

# DCDの発現メカニズム

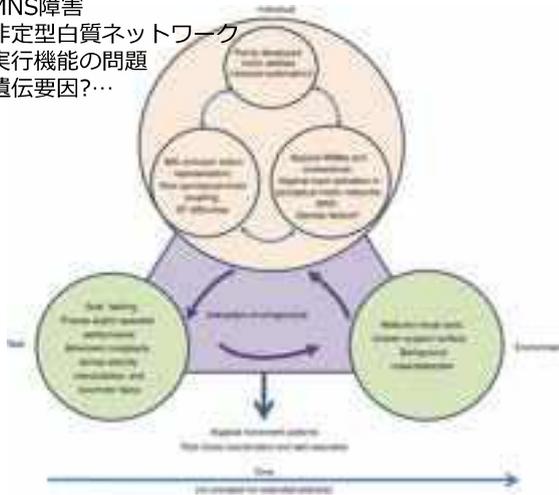
## 新DCD国際ガイドライン. 2019

現在最も有力とされていて、エビデンスレベルが高い考えは、

①DCDは神経発達障害であり、

②運動制御・運動学習を担う脳のシステムの問題である。

内部モデル障害  
MNS障害  
非定型白質ネットワーク  
実行機能の問題  
遺伝要因?...



運動学習システム障害

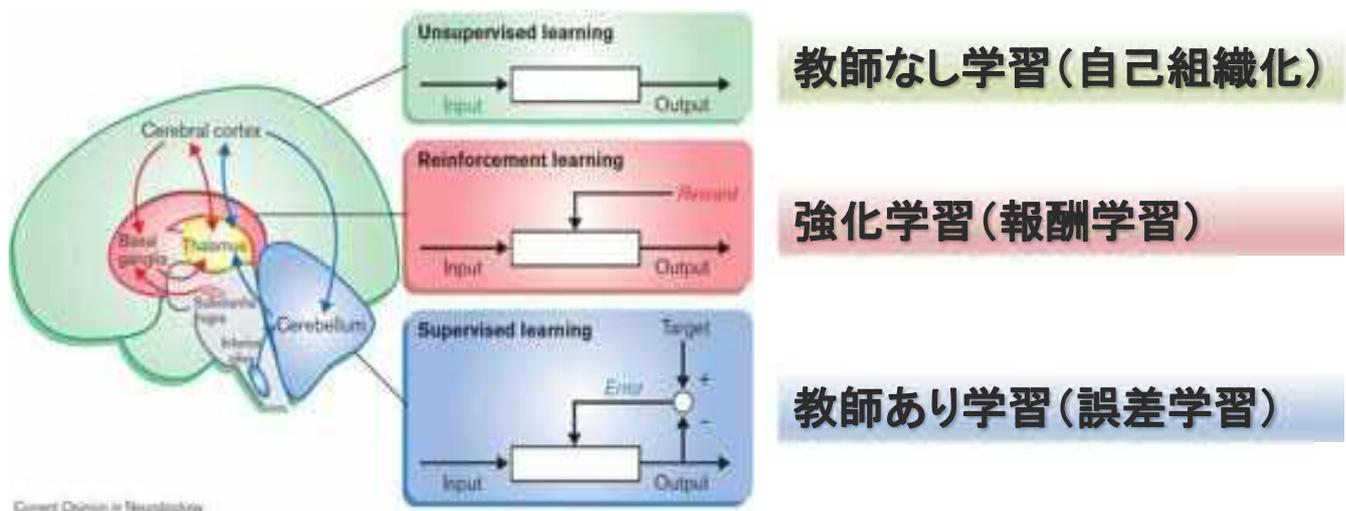
ミラーニューロンシステム (MNS) 障害

2011-2016DCDの根底にあるメカニズムを調査した研究 (106)の中でも最も多い (91) の研究からの行動データは、**運動制御 (運動計画と予測的制御を含む)**、**運動学習 (手続き学習を含む)**、および**認知制御 (または実行機能)**の様々な側面に渡る障害の幅広いクラスターが示された。

エビデンスは、**内部モデルとMNSを介した観察学習**を支える**感覚運動ネットワークの発達の遅れ**により、**外部フィードバックに依存する (代償戦略を採用する)** という仮説を支持する傾向にある。

Blank R, Barnett AL, Cairney J, Green D, Kirby A, Polatajko H, Rosenblum S, Smits-Engelsman B, Sugden D, Wilson P, Vinçon S. International clinical practice recommendations on the definition, diagnosis, assessment, intervention, and psychosocial aspects of developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, Volume: 61, Issue: 3, Pages: 242-285, First published: 22 January 2019, DOI: (10.1111/dmcn.14132)

## 脳の中の3つの運動学習システム

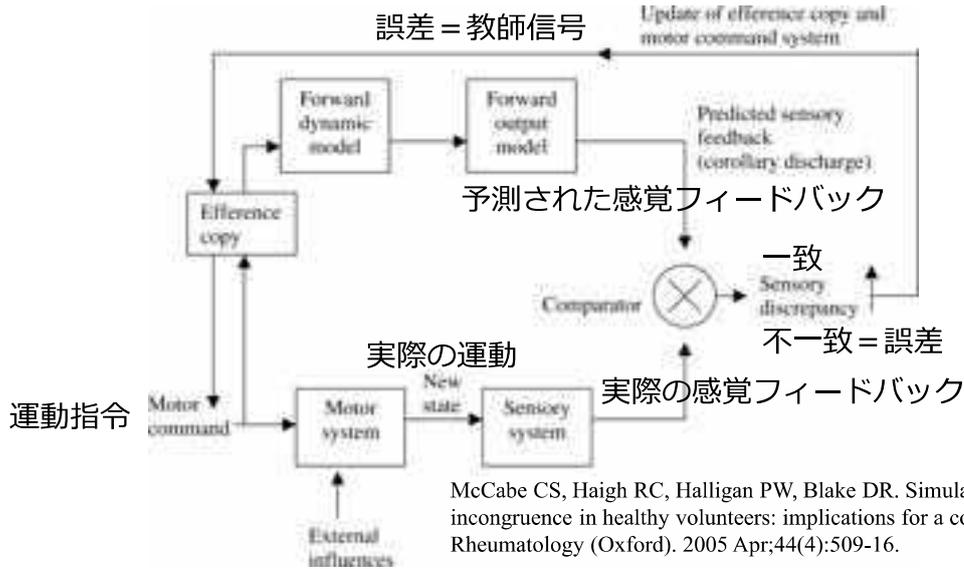


Doya K. Complementary roles of basal ganglia and cerebellum in learning and motor control. *Curr Opin Neurobiol*10(6):732-739, 2000.

DCDの要因 (原因) として挙げられるのが、**教師あり学習障害 (一次要因)** と**強化学習不全 (二次要因)** である。

# 教師あり学習とは？

“こういう運動をすれば，こういう結果が返ってくるのではないか” = 運動結果の予測



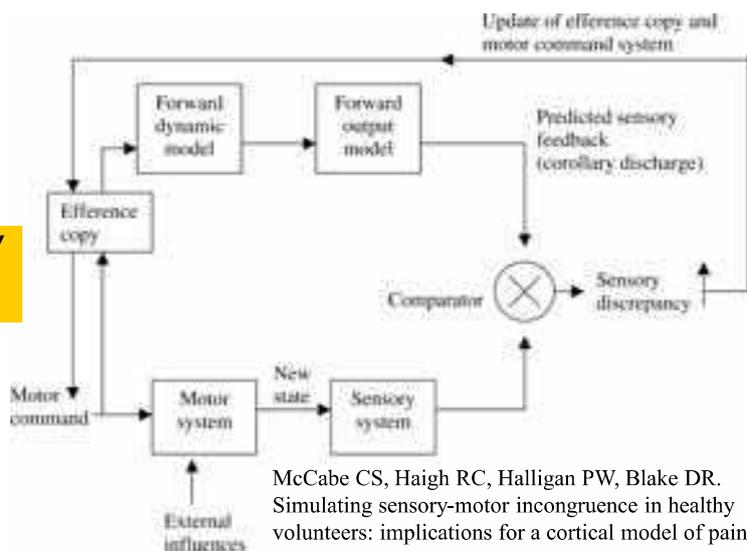
“こういう運動をしたら，こういう結果が返ってきた” = 実際の運動結果

教師あり学習では，運動の予測と実際の感覚フィードバックを脳内（e.g. 頭頂葉や小脳）において比較し，誤差が生じれば，それを教師信号にして次の運動指令を修正していく．それを繰り返すと，徐々に誤差は少なくなり，運動が最適化されていき，誤差が生じなくなる = 運動が成功する = 運動学習．

簡単に表現すると，「失敗を糧に学習する」学習様式のこと．

# 教師あり学習の結果として生成される内部モデル

“こういう時は，こうすれば良い”  
= 運動のモデル = 内部モデル



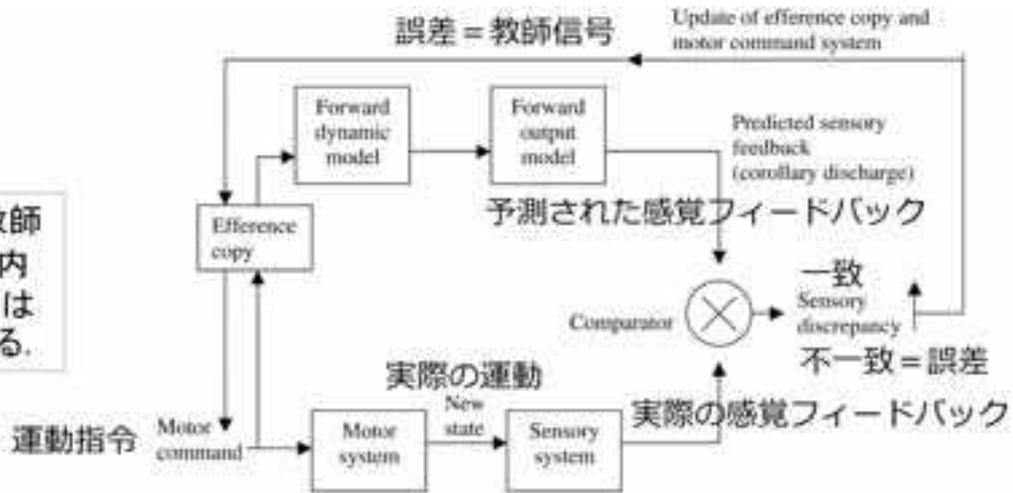
内部モデルとは，教師あり学習によって脳内に生成・保存された身体と外界との関係性についての内的表現のことであり，同じような環境（状況，場面）に遭遇した際に，瞬時に取り出され利用される．したがって予測的運動制御機構とも呼ばれる．

# DCDにおける教師あり学習（内部モデル）障害の特徴

① 内部モデルの形成障害：DCDでは、運動結果の予測と感覚フィードバックを比較して、誤差信号（教師信号）を抽出することand/or運動を修正することに困難がある。  
⇒運動学習に非常に時間がかかる。

※結果的に失敗したことは分かって、なぜ失敗したのか、どこが悪いのか具体的な内容に気付くことができない。

DCDが有する教師あり学習困難（内部モデル障害）は2つに要約できる。



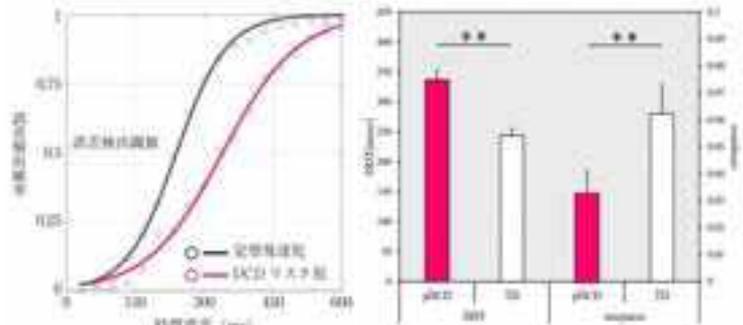
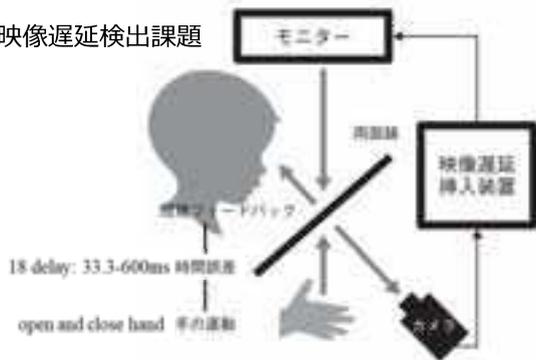
McCabe CS, Haigh RC, Halligan PW, Blake DR. Simulating sensory-motor incongruence in healthy volunteers: implications for a cortical model of pain. Rheumatology (Oxford). 2005 Apr;44(4):509-16.

② 内部モデルの利用障害：DCDでは、内部モデルの形成に成功したとしても、その内部モデルを適切な場面で使用することにも困難がある。  
⇒せっかく学習しても簡単に忘れてしまう。

## 内部モデル障害

Nobusako S, Sakai A, Tsujimoto T, Shuto T, Nishi Y, Asano D, Furukawa E, Zama T, et al. Deficits in Visuo-Motor Temporal Integration Impacts Manual Dexterity in Probable Developmental Coordination Disorder. Front Neurol. 2018 Mar 5;9:114.

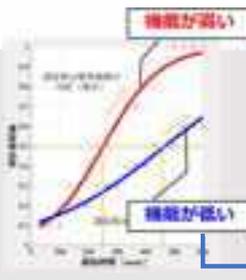
映像遅延検出課題



pDCD児には誤差検出機能の低下があった

予測（運動）  
結果（感覚）  
時間誤差  
子どもたちは誤差検出を行う

誤差信号を検出する機能の定量化



Manual dexterity percentile	Age	Experimental task 1	
		DDT	Steepness
Manual dexterity percentile	0.030	-0.577**	0.281**
Age		-0.147	0.211**
Experimental task 1			
DDT			
Steepness			-0.480**

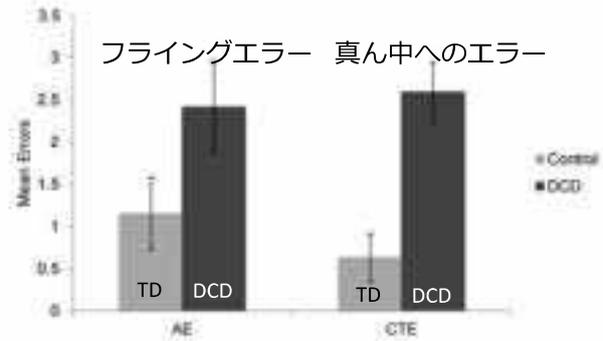
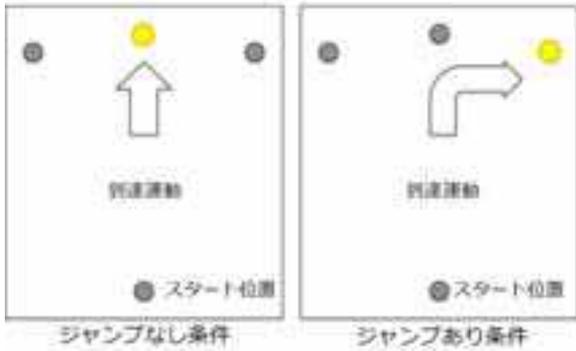
手先の器用さ



誤差検出の低下と微細運動技能の低下に相関関係

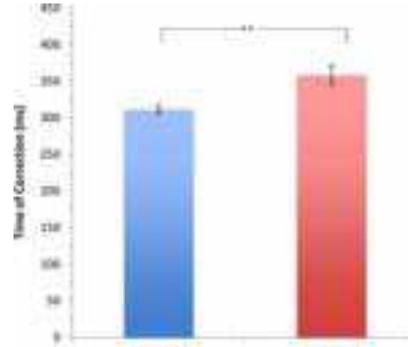
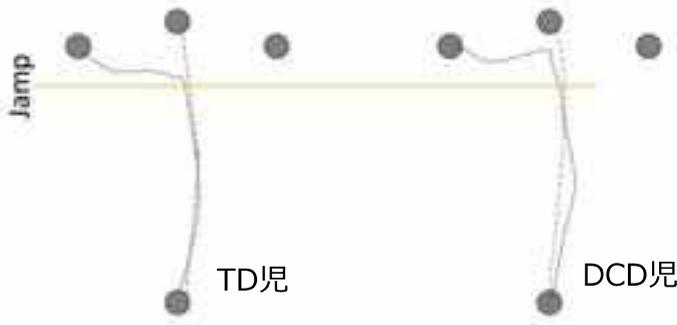
DCD児では、予測と結果を比較して、運動を修正するための栄養となる誤差信号（教師信号）を抽出することが困難

## 内部モデル障害



Hyde C, Wilson PH. Dissecting online control in Developmental Coordination Disorder: a kinematic analysis of double-step reaching. Brain Cogn. 2011 Apr;75(3):232-41.

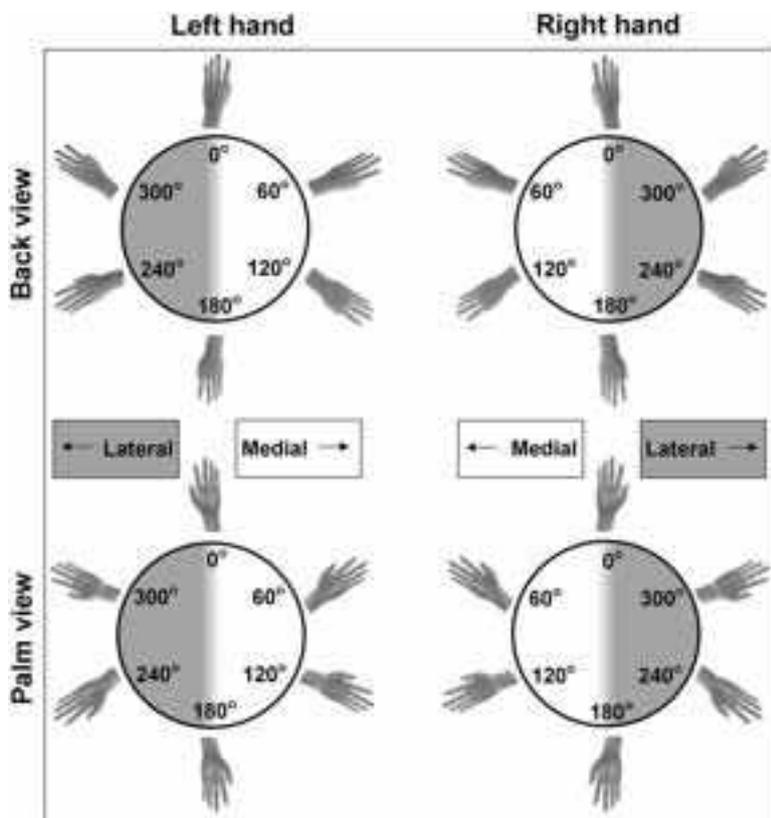
Hyde C, Wilson P. Online motor control in children with developmental coordination disorder: chronometric analysis of double-step reaching performance. Child Care Health Dev. 2011 Jan;37(1):111-22.



DCD児では、内部モデルにおける誤差（教師信号）抽出-運動修正機能が、TD児と比較して低下している

Hyde C, Wilson PH. Dissecting online control in Developmental Coordination Disorder: a kinematic analysis of double-step reaching. Brain Cogn. 2011 Apr;75(3):232-41.  
 Fuelscher I, Williams J, Enticott PG, Hyde C. Reduced motor imagery efficiency is associated with online control difficulties in children with probable developmental coordination disorder. Res Dev Disabil. 2015 Oct-Nov;45-46:239-52.

## 内部モデル障害



内部モデルを利用する能力の定量的指標

- 手の左右判断課題
- 手のメンタルローテーション課題
- 手の運動イメージ課題

課題は、モニター上に提示された手が、右手なのか左手なのか、自分の実際の手は動かさずに回答することが求められる。

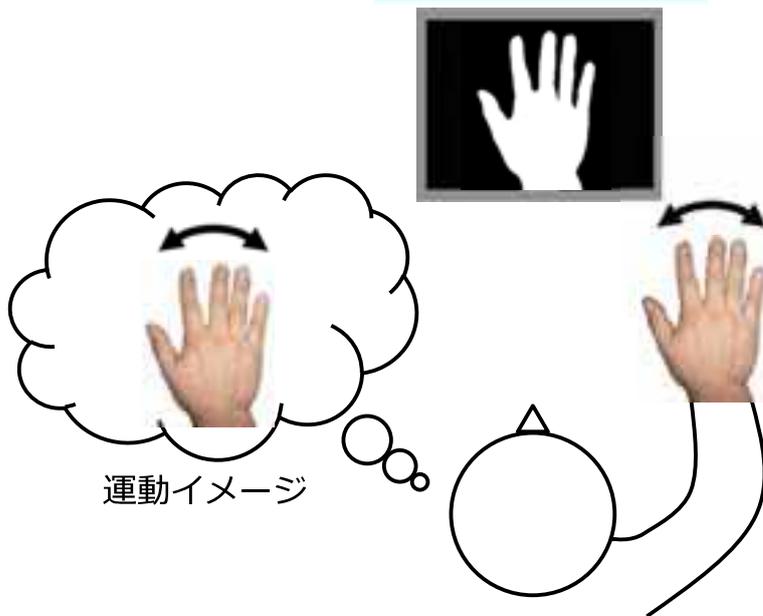
したがって、被験者は、自分の手を想像的に動かす必要が生じる。

その際の正反応時間、正答率を測定することで、内部モデルを利用する能力（運動イメージ能力）を客観的・定量的に測定することが可能。

この課題における正反応時間の短縮と正答率の向上は、内部モデルを利用する能力（運動イメージ能力）が高いことを表す。

Spuijts S, van der Kamp J, Steenbergen B. Current insights in the development of children's motor imagery ability. Front Psychol. 2015 Jun 10;6:787.

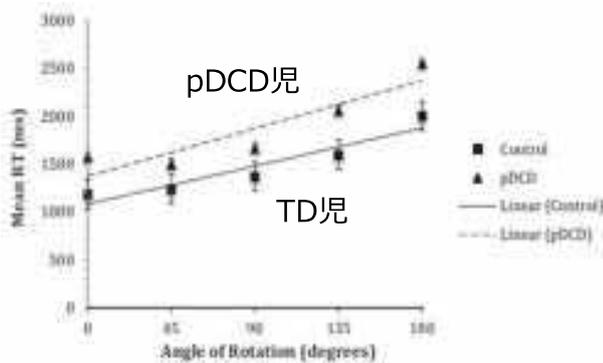
## 運動イメージ



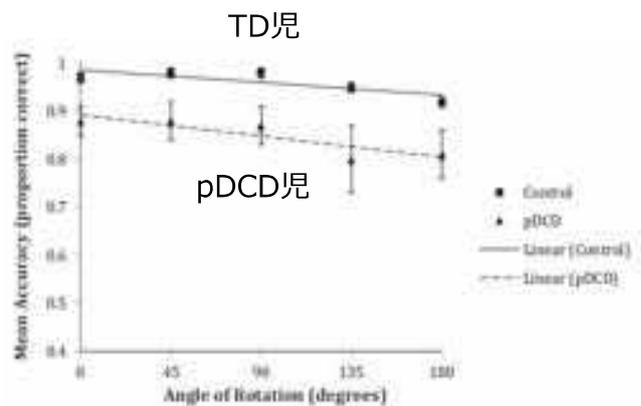
実際の手の運動は行えないので、自分の手を脳内で想像的に動かして、画面上の手に重ねることで、右手か左手かを判断したのではないのでしょうか？

## 内部モデル障害説（内部モデル利用障害）の検証

正反応時間



正答率

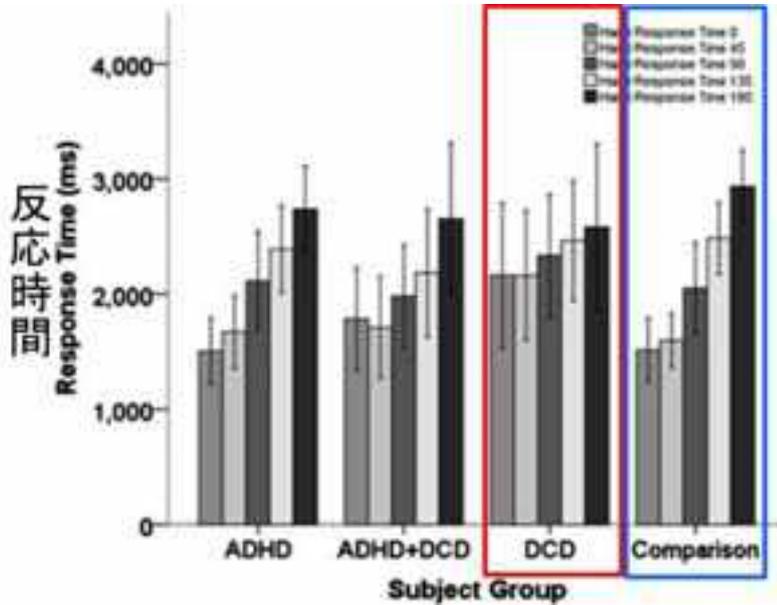
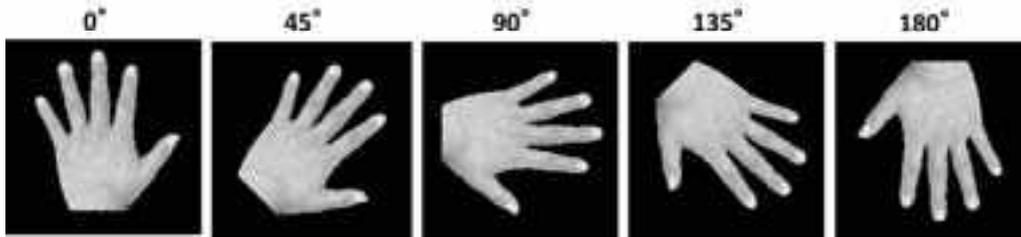


pDCD児では、TD児と比較して、反応時間が遅い。

pDCD児では、TD児と比較して、正答率が低い。

pDCD児では、TD児より、内部モデルを利用する（運動イメージ）機能が低い。

# 内部モデル障害説（内部モデル利用障害）の検証



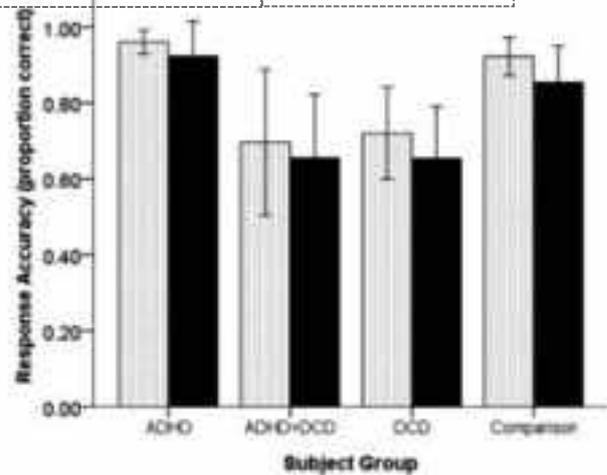
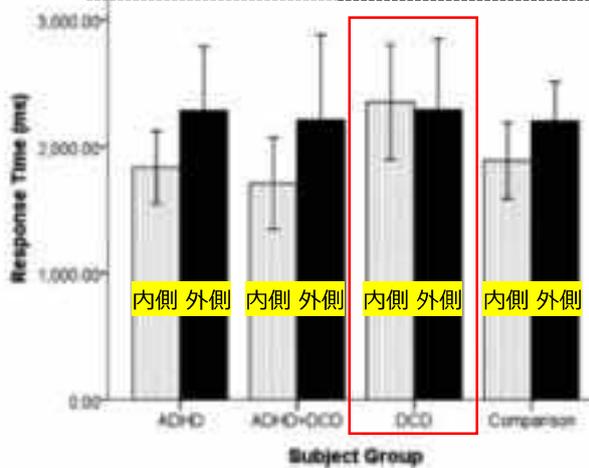
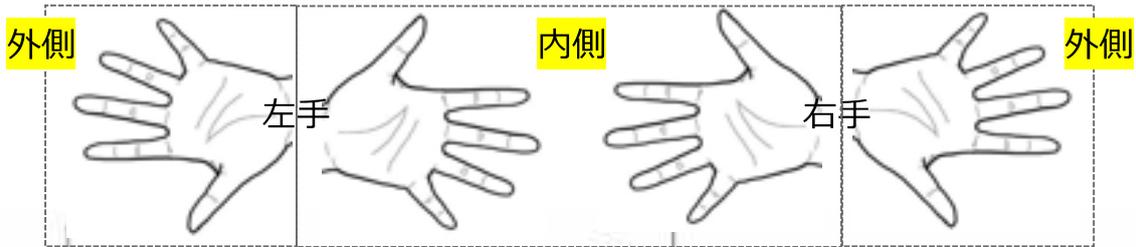
フィッツの法則  
実運動と運動イメージには時間的一致性がある。

定型発達  
手のメンタルローテーション角度が増加するほど、正反応時間が延長する。フィッツの法則が成立。

DCD  
手のメンタルローテーション角度が増加するほど、正反応時間が延長するというグレーディングがあまりない。

Williams J, Omizzolo C, Galea MP, Vance A. Motor imagery skills of children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder and Developmental Coordination Disorder. Hum Mov Sci. 2013 Feb;32(1):121-35.

## DCD児では生体力学的効果が生じない!?



生体力学的効果（外側よりも内側が早い）は、ADHDでは定型発達と同様にみられる。DCDでは生体力学的効果がみられなかった。つまり運動イメージを想起していない。

Williams J, Omizzolo C, Galea MP, Vance A. Motor imagery skills of children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder and Developmental Coordination Disorder. Hum Mov Sci. 2013 Feb;32(1):121-35.

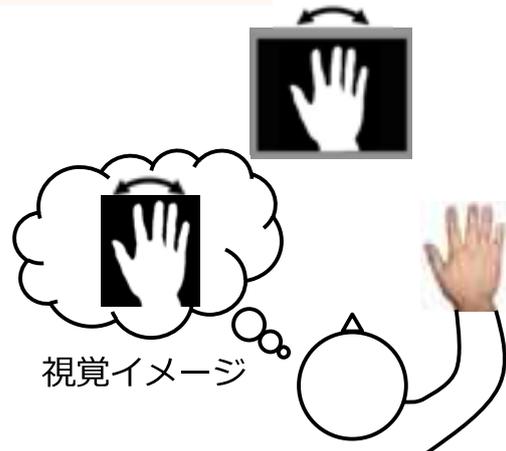
# DCDを有する児の運動イメージの特徴



TD児

## 運動イメージ戦略

自分の手を脳内で想像的に動かして、画面上の手に重ねることで、右手か左手かを判断する。



DCD児

## 視覚イメージ戦略

画面上の手を脳内で想像的に動かして、自分の手に重ねることで、右手か左手かを判断する。

環境に合わせて身体を動かす戦略

環境適応：環境に対して適応的な身体の動き、運動の成功につながる。

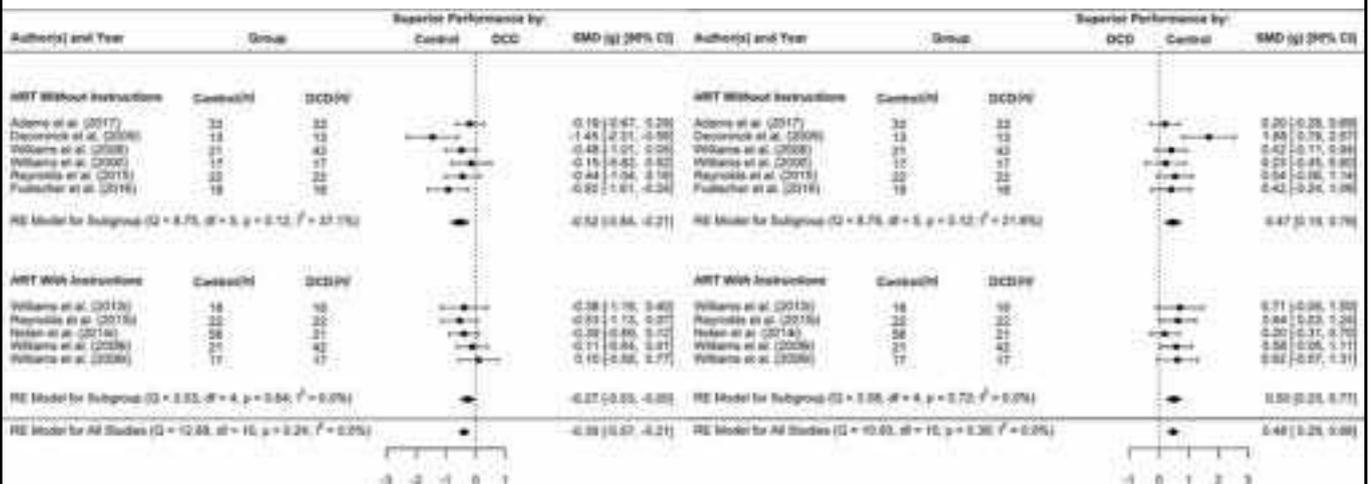
身体に合わせて環境を動かす戦略

実際には、身体に合わせて環境が変化してくることはないので、運動の失敗に繋がる。

# DCDを有する児に対するメンタルローテーション課題を使用した研究のメタアナリシス

## DCDとTDでの正反応時間の比較

## DCDとTDでの正答率の比較



上は、**練習・指示あり**（練習課題や全ての画像を全て見るなどの準備，そして画像に自分の手を合わせるイメージをするようにという指示があった場合）。

下は**練習・指示なし**（単純に画像が左手か右手かをできるだけ迅速かつ正確に判断し回答する指示のみ）。

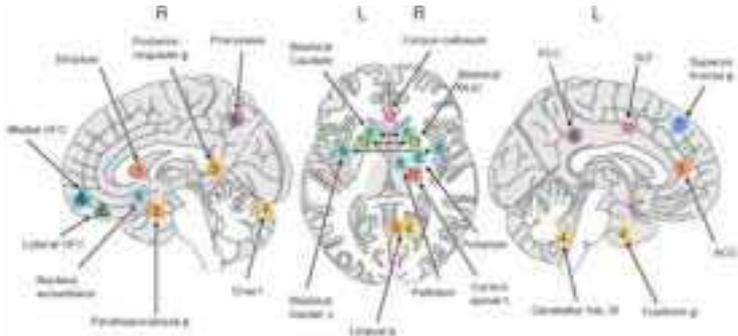
結果は、DCDを有する児では、**練習・指示があってもなくても、運動イメージを想起することが困難である（内部モデルを利用する能力が低下している）**ことが示された。

# 内部モデル障害の脳イメージング研究による証拠

## 小脳

### Cerebellum

The cerebellum was targeted in these studies because of its role in movement, balance, coordination, learning, and automatization. Four studies (70, 71, 73, 78) observed specific features within this area. Lobule VI was highlighted in three of them (70, 71, 78), and Debrauwer et al. (70) concluded that it is a significant predictor for DCD. Crus I was also mentioned by Zwicker et al. (71) and Debrauwer et al. (73), as well as Lobule IX (71). Overall, this overview highlights a particular role of Lobule VI in the neuropathology of DCD. However, there is converging evidence in the literature that the cerebellum is a common source of neuropathology in children with neurodevelopmental disorders (89). Thus, although DCD is probably linked to cerebellar dysfunction, it would be difficult to use the latter as a specific signature of DCD, given the evidence of cerebellar involvement in all other neurodevelopmental disorders (e.g., ADHD, ASX, DW).

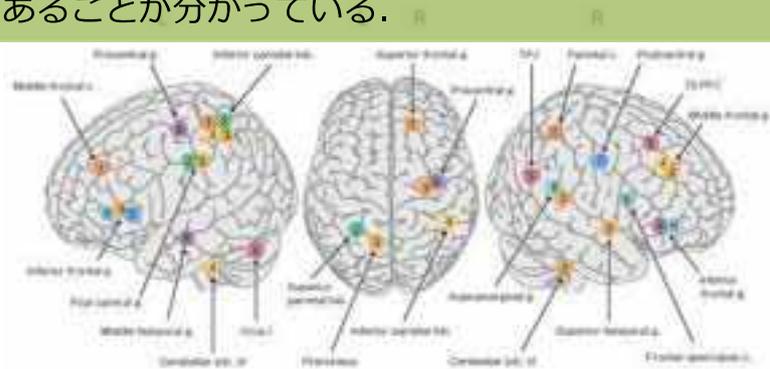


DCDを有する子どもでは、定型発達児と比較して、教師あり学習（内部モデル）を担う脳機能の低下があることが分かっている。

## 頭頂葉

### Parietal Lobe

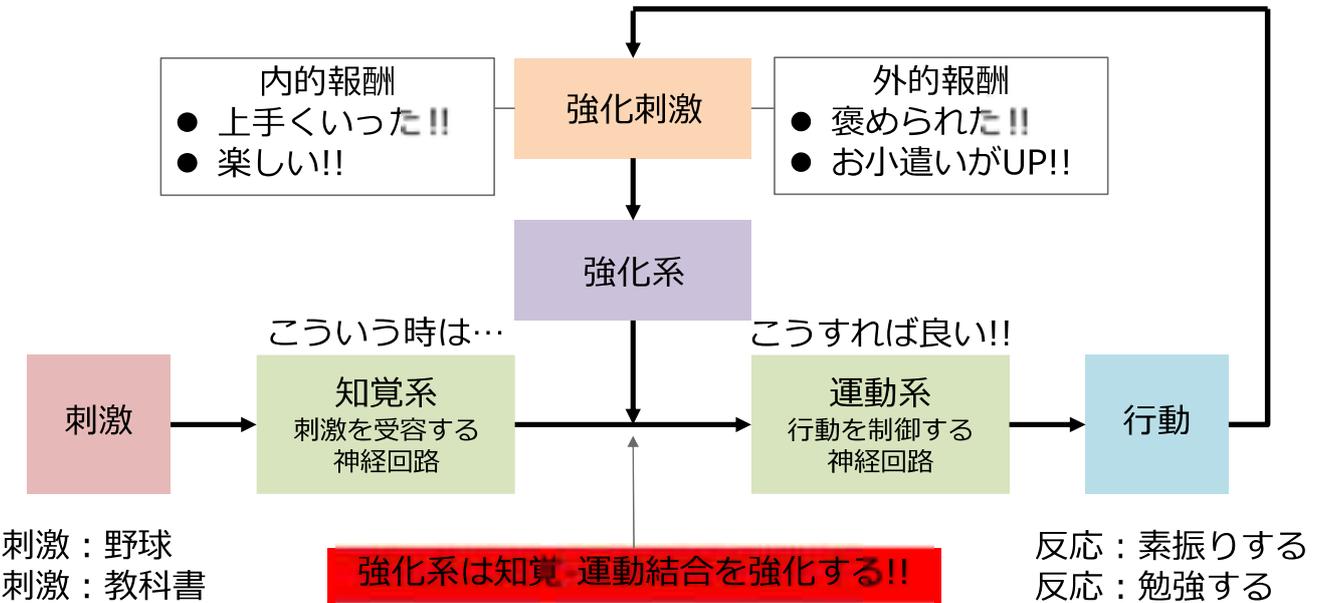
The parietal lobe is a promising structure in the search for neural correlates in DCD. Eleven of the 14 neuroimaging studies mentioned its involvement in DCD. Differences were found in the IPC (64, 71), superior parietal cortex (60, 79), PPC (40), postcentral gyrus (69, 76, 78, 77), supratarginal gyrus (70, 78), STP C (3), and parietal operculum cortex (74). Additionally, Quinte et al. (64) noted decreased coefficients for the paths between the striatum and parietal cortex in the right hemisphere in children with DCD. These findings were consistent with those of McLeod et al. (74) who found decreased FC between M1 and the striatum and angular gyrus in the DCD group. It should, however, be noted that the authors concluded that these brain regions are common neurophysiological substrates of both DCD and ADHD, as this specific decrease was observed in all three groups. Once again, therefore, abnormalities in this brain region are probably not peculiar to DCD and could be common to other neurodevelopmental disorders.



Biotteau M, Chaix Y, Blais M, Tallet J, Péran P, Albaret JM. Neural Signature of DCD: A Critical Review of MRI Neuroimaging Studies. Front Neurol. 2016 Dec 16;7:227.

## 強化学習とは??—報酬学習

成果：良い成績が採れた = 成功体験  
 成果：ホームランが打てた



強化学習とは、ある運動（知覚と運動の接続）活動に対して、報酬が付与されることにより、その接続（知覚-運動結合）が強化される現象である。

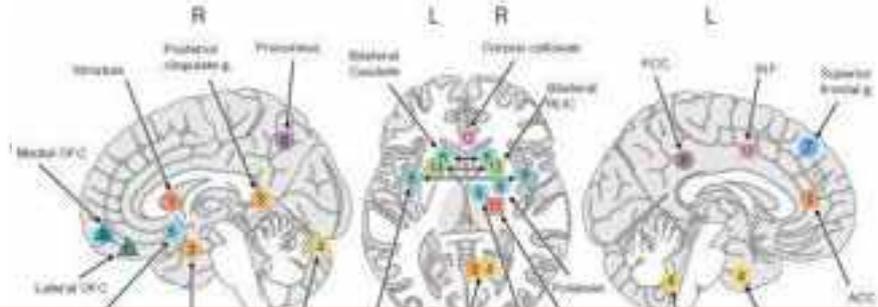
強化学習を進める中脳ドーパミン細胞は、報酬そのものというより、報酬予測誤差をコード化しており、正の報酬予測誤差（報酬予測よりも実際の報酬が上回る時に）最もドーパミンを放出する。

# DCDにおける強化学習不全

## Basal Ganglia

The accident of their primary role in movement initiation, planning, motor control, learning, and performance, the BGs are viewed as being particularly implicated in DCD. Several neuroimaging studies have been conducted that have reported that the BGs are involved in the planning and execution of motor tasks. (Lust et al., 2019) Several studies have reported that the BGs are involved in the planning and execution of motor tasks. (Lust et al., 2019) Several studies have reported that the BGs are involved in the planning and execution of motor tasks. (Lust et al., 2019)

大脳基底核



## Limbic Lobe

There are few hypotheses of limbic lobe involvement in the pathophysiology of DCD, even though several neuroimaging studies have found evidence of such involvement. (Lust et al., 2019) There are few hypotheses of limbic lobe involvement in the pathophysiology of DCD, even though several neuroimaging studies have found evidence of such involvement. (Lust et al., 2019)

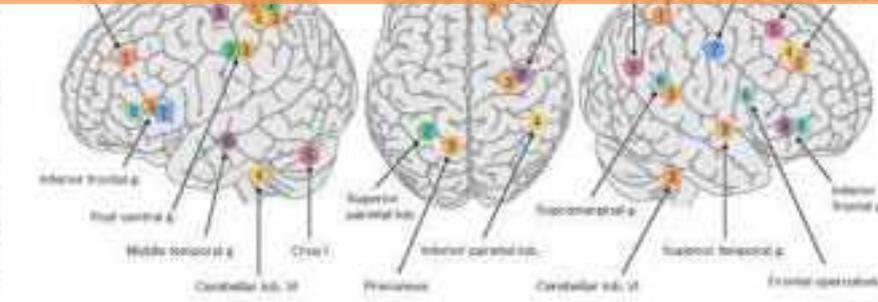
大脳辺縁系

DCDを有する子どもでは、一次要因である教師あり学習障害のために運動が不器用になり、結果的に運動の成功体験（内的報酬）や他者（大人）から褒められるといった経験（外的報酬）が減少する。そのため二次的に強化学習（報酬学習）に関わる脳領域の機能低下が生じる。

## Frontal Lobe

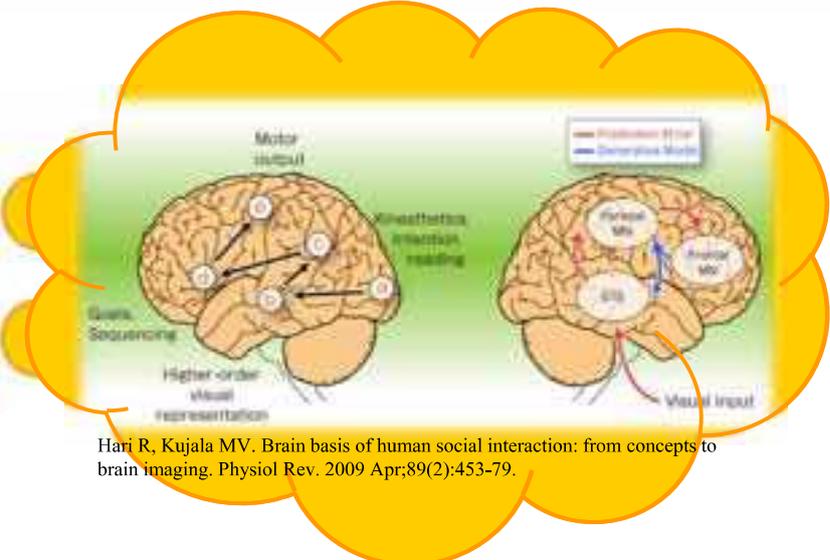
Frontal lobe dysfunction has been found to affect all DCD children. The frontal lobe is the largest and most complex part of the brain, and it is involved in many functions, including planning, decision-making, and social interaction. (Lust et al., 2019) Frontal lobe dysfunction has been found to affect all DCD children. The frontal lobe is the largest and most complex part of the brain, and it is involved in many functions, including planning, decision-making, and social interaction. (Lust et al., 2019)

前頭葉



Biotteau M, Chaix Y, Blais M, Tallet J, Péran P, Albaret JM. Neural Signature of DCD: A Critical Review of MRI Neuroimaging Studies. Front Neurol. 2016 Dec 16;7:227.

# 観察・模倣学習の脳内基盤：ミラーニューロンシステム



Hari R, Kujala MV. Brain basis of human social interaction: from concepts to brain imaging. Physiol Rev. 2009 Apr;89(2):453-79.

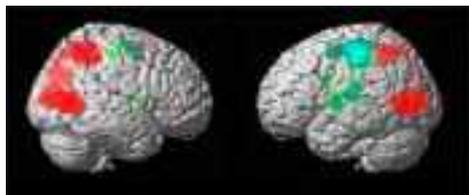
- 発達初期から多くの日常生活動作・スポーツスキルについて、熟達者（大人）の動作を観察・模倣（見て，真似）することで身に付けており，こうした他者動作の観察・模倣学習の脳内基盤がミラーニューロンシステム（MNS）である。
- MNSは、**自己の行為**を生成するだけでなく、**他者の行為の視覚像**をも**共通に脳内表現**するニューロン集団間のネットワークのことである。
- **DCD児においては、このMNSの活動が低下しているために、観察・模倣学習が困難であることが明らかになっている**（fMRI研究: Reynolds et al., 2015, 2017; EEG研究: Lust et al., 2019）。

## ミラーニューロンシステム障害

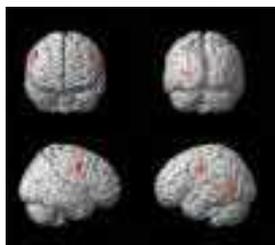


対象：DCD児14名（平均年齢10歳，7歳-11歳）  
 TD児12名（平均年齢10歳，8歳-12歳）

フィンガーシークエンシャル課題の実行，観察，模倣



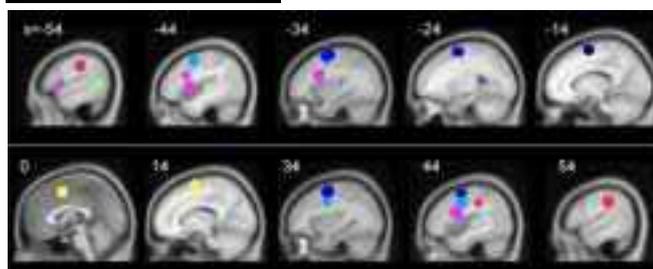
▲全ての児の脳活動



◀DCD児よりTD児で活動が大きかった領域。

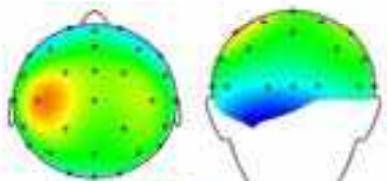
▼関心領域

結果：観察および模倣時のミラーシステムに相当する領域（IFG-IPL-STS）の活動は，TD児に比べて，DCD児で減少していた。

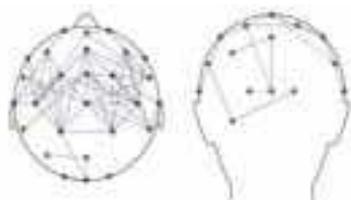
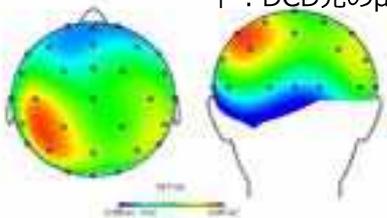


Reynolds JE, Licari MK, Billington J, Chen Y, Aziz-Zadeh L, Werner J, Winsor AM, Bynevelt M. Mirror neuron activation in children with developmental coordination disorder: A functional MRI study. *Int J Dev Neurosci.* 2015 Dec;47(Pt B):309-19.

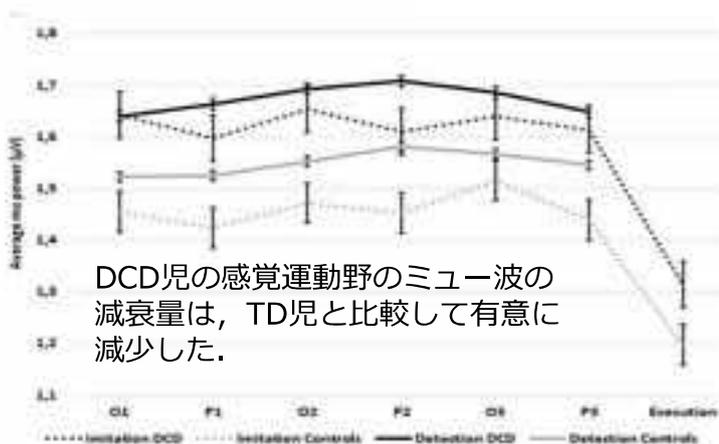
## ミラーニューロンシステム障害



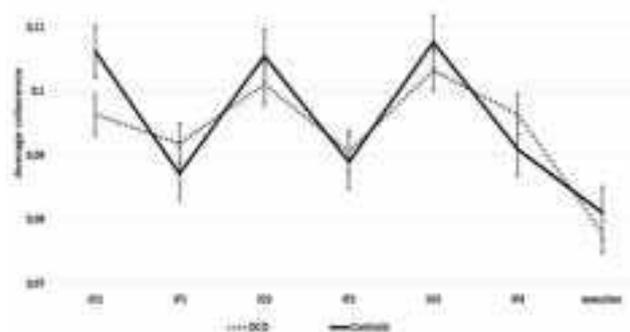
上：TD児のμ波power  
 下：DCD児のμ波power



前頭-頭頂ネットワークのμ波コヒーレンス  
 TD児の前頭-頭頂μ波コヒーレンスの変動量と比較して，DCD児のそれは弱かった。



DCD児の感覚運動野のミュー波の減衰量は，TD児と比較して有意に減少した。

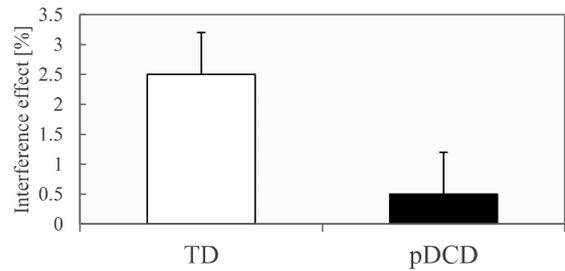
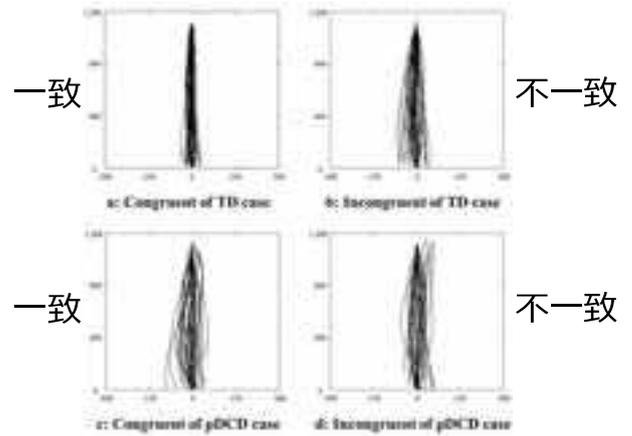
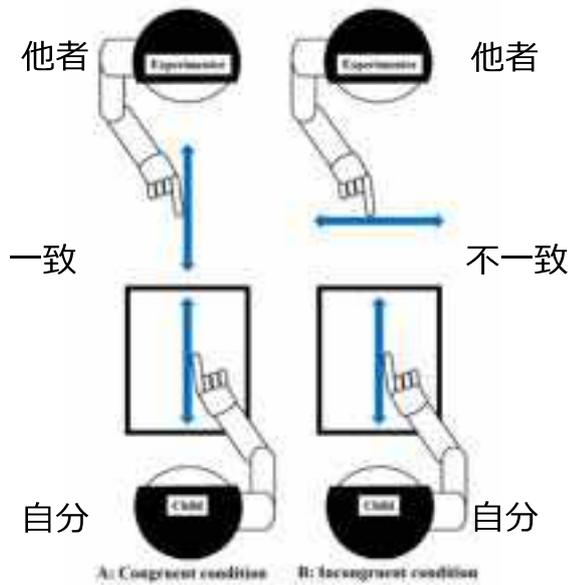


Lust JM, van Schie HT, Wilson PH, van der Helden J, Pelzer B, Steenbergen B. Activation of Mirror Neuron Regions Is Altered in Developmental Coordination Disorder (DCD)-Neurophysiological Evidence Using an Action Observation Paradigm. *Front Hum Neurosci.* 2019 Jul 11;13:232.

# 自動模倣機能の障害

## 運動共鳴課題

干渉効果の増加 = 自動模倣を反映

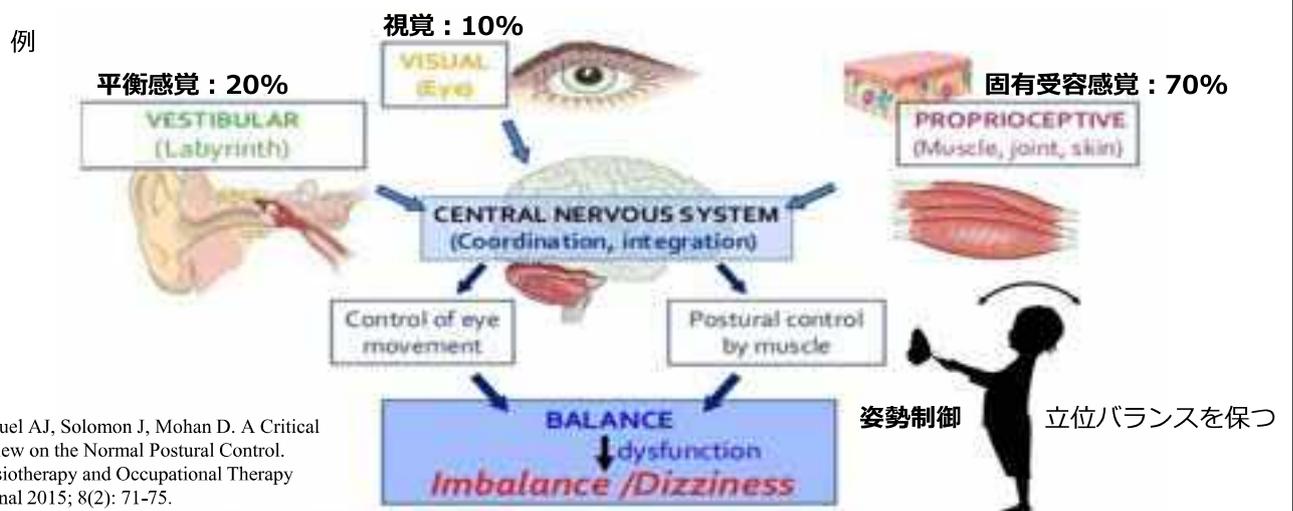


pDCD児の干渉効果は有意に低下 = DCDでは自動模倣機能が低下している  
 ⇒他者の運動を見ることで自然に運動スキルを身に着けるといことにも困難がある

Nobusako S, Sakai A, Tsujimoto T, Shuto T, Nishi Y, Asano D, Furukawa E, Zama T, Osumi M, Shimada S, Morioka S, Nakai A. Deficits in Visuo-Motor Temporal Integration Impacts Manual Dexterity in Probable Developmental Coordination Disorder. Front Neurol. 2018 Mar 5;9:114.

# DCDにおける感覚の利用特性

運動を遂行するには、その運動を成功させるのに最も重要な感覚を優先的に利用する必要がある  
 =Sensory Weighting/Reweighting (感覚の重み付け/再重みづけ)



Samuel AJ, Solomon J, Mohan D. A Critical Review on the Normal Postural Control. Physiotherapy and Occupational Therapy Journal 2015; 8(2): 71-75.

Fig. 1: Somatosensory, vestibular, and visual sensory system interaction

DCD児の感覚の利用特性として、**視覚**に頼りやすいことが示唆されていた