

# 人間固有の「能動的・主体的学び」を支える脳構造 & 機能とその生涯にわたる発達

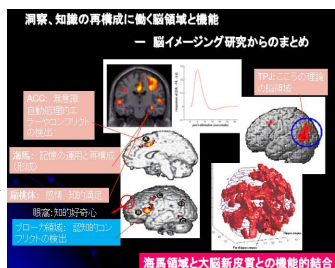
～ 生涯にわたるアクティブ・ラーニング(AL)を反映した脳発達 ～

仁木和久<sup>1,2</sup>、緩利誠<sup>3</sup>、内海緒香<sup>1</sup>、榊原洋一<sup>1</sup>、岩野孝之<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>お茶の水女子大学 人間発達教育科学研究所、<sup>2</sup>産業技術総合研究所 人間情報研究部門、<sup>3</sup>昭和女子大学)

【はじめに】本パネルでは、アクティブ・ラーニング(AL)の骨幹である「能動的・主体的な学び」を支える脳システムの構造と機能が生涯に渡り変化・変容する様相を示し、脳発達段階に応じた適切なアクティブ・ラーニング教育が必要不可欠であることを示唆する。

**1 アクティブ・ラーニングを支える「行為の学習と記憶」を担う脳システム**  
記憶中枢「海馬」を中核とし、感情中枢「扁桃体」、心の理論・自己参照を担う「TPJ」、認知的選択や対人行為で働く「ACC」等で構成される脳システムが「行為(意図をもった行動)の学習と記憶」を実装・実現していることを、脳科学と教育プロジェクトで実施した我々の一連の脳イメージング研究で明らかにした。

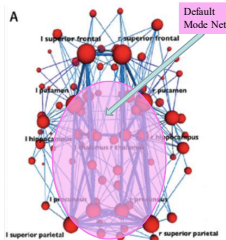


図A 「行為の学習&記憶」に寄与する脳システム行為の意図目標達成時に、海馬と扁桃体、ACC、TPJの脳活動をともない、強固で柔軟な長期記憶が形成する。

- 意欲を持ち、自ら考え、問題解決を行う主体的な学びで起こる「行為の学習・記憶」はALの主要な特徴を全て備えている：
- (1) 一回起性の速い形成と、長期記憶特性 (1ヶ月以上。人間では一生！)
  - (2) 多様性と普遍性(行為の海馬バインディング脳表現：原理は1つで表現の)
  - (3) 行為と知能の双対性；知能は行為の記憶の蓄積。知能の発揮で行為
  - (4) 行為における意図の役割：タスク目的、タスク関連性；長期的学習
  - (5) 知能形成の構成性 (バインディング脳表現は、容易に再構成可能)
  - (6) 外界に開かれた知能特性 (社会・文化に蓄積された知識・技能の利用、自らの知識の社会的共有)
  - (7) 脳の上に構築されたところのシステム (図A参照)

## 2 「行為の学習と記憶」の脳システムはDefault Mode Netに属す！

脳の深部には安静時にも活動し脳の消費エネルギーの60-80%を消費するDefault Mode Net(DMNと略す)があり、内因的な神経活動源となっている。「行為の学習」で重要な役割を担う海馬と扁桃体、ACC、TPJは全てこのDMNに属している。



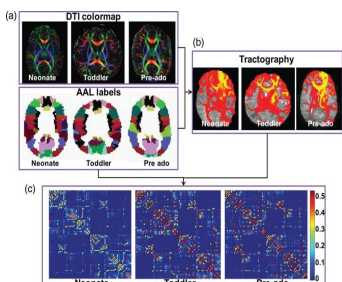
最近、全脳的な脳システムの構造と機能の結合構造を調べるConnectome解析や、大規模神経回路のトポロジー特徴(モジュール性、Hub結合、Small World性など)を調べるGraph理論解析が進歩し、「行為の学習」で重要な脳システムがDMNのHub構造であり、Hub同士が密接に連結したRich Hub Club構造を形成し、他のモジュールとの連携動作での中核となる結節点Hubとして機能していることが分かってきた。従い、「行為の学習と記憶」を調べるALの

脳科学研究を、DMNのHub構造や機能、そして全脳的なモジュールとの協調活動を解明する研究へと進化させることができる。

本ポスターでは、最近のConnectome研究の成果を引用し、DMNのHub構造と全脳的なモジュール構造の生涯に渡る変化(=脳発達)を示す。ALの主体的・能動的な学びの青年期までの獲得には、学齢に応じたAL教育を、脳の発達も考慮し適切に設定することが必要だと思われる。

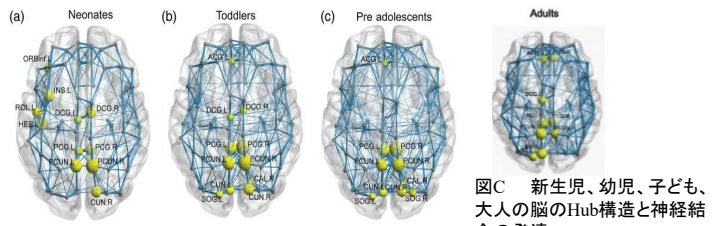
## 3 新生児から幼児、子ども期の脳発達

図B(c)の神経結合MatrixデータをGraph理論解析することで、新生児(生後28日未満)、よちよち歩きの幼児、9~12歳の子ども期の脳のHub構造を図Cに示す。他のGraph理論的解析結果も参照すると、新生児の時に、脳の基本的な構造(モジュール性、Small World性、Hub構造)は概形がほぼ完成されているが、海馬が機能や前頭葉の機能が未完成・弱いこと、神経結合も少なく・弱いことが分かる。幼年期、子ども期では、モジュール内の神経結合が増え、

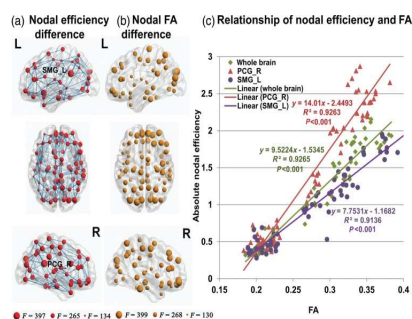


図B DTI(Diffusion Tensor Imaging)で計測したデータ(図B(a),(b))を処理し神経軸索走行(B)を調べ、全脳の約90の脳部位間の神経結合Matrix(C)を作成する。

恐らくスキルや認知実行機能の強化と関連する。年齢が上がると、Hub間の結合が強化されRich Hub Clubが強化され、ALの為の脳構造が整えられていく様子が伺える。更に、図Dのように、様々なGraph測度を使い脳の機能と構造の発達を浮き彫りにすることができる。



図C 新生児、幼児、子ども、大人のHub構造と神経結合の発達



図D

Topologic Properties	Descriptions
Degree (or strength)	Number of connections (sum of all connection weights) of a node
Hub	A topologically important node with high centralities (e.g. degree)
Rich club	A structural system composed of densely interconnected hubs that has a central role in generating globally efficient information flow
Motif	A family of connected graphs or networks consisting of $M$ vertices and a set of edges, referring to a rich repertoire of local connectivity patterns
Small-world	An economic topology with high clustering coefficient and short path length or both high global and local information efficiencies
Module	A subset of highly interconnected nodes that are relatively sparsely connected to nodes in other modules

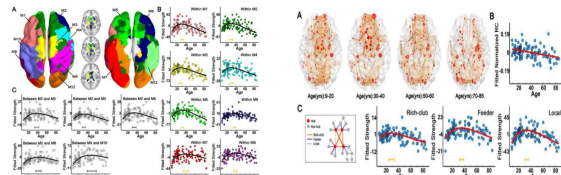
For the details of definitions and descriptions, please refer to Bullmore and Sporns (2009, 2012), Rubinov and Sporns (2010), He and Evans (2010), and Meunier and others (2010).

## 4 子ども期と青年期の人間固有な脳発達

人間の発達は、幼児期、子ども期、少年期、青年期、成人(壮年、中年)、高齢期と続くが、子ども期と青年期(そして高齢期)は(他の社会的動物になく)人間固有といわれています。子ども期と青年期の脳科学は、この時期に側座核や眼窩皮質(OFC)の構造や機能の変化があり、この2つの脳活動が不安定になることを示しています。側座核は海馬と前頭葉との中継核であり、一方眼窩皮質は、長期的報酬学習に関与し、両者は共に意欲に関与するなど「行為の学習と記憶」で重要な役割を担っています。見方を変えると、この2つの重要な時期を乗り越えALを成長させることが、主体的・能動的な行為者として成長するために必要不可欠です。

## 5 生涯に渡る脳発達

生涯に渡る脳モジュールの発達を図Eに、Hub構造の発達を図Fに示す。AL関連領域として注目する脳領域では、40歳近くまで脳の構造的な発達が継続していることが分かる。

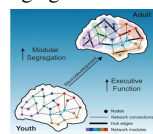


図E 脳モジュールの発達

図F Hub構造の発達

## 6 認知実行機能の発達に伴う脳構造(特にモジュラー構造)の変化

脳構造の発達が(脳&認知)機能の発達の基盤となっていると共に、脳機能の発達が脳構造を変える。この発達変化は、脳モジュールの分割・細分化Segregationの形をとる。



【おわりに】 幼児期、子ども期、少年期の発達段階の全脳的な発達を示した。DMNのHub構造と全脳的なモジュール構造の変化に注目することで、青年期・成人期でのアクティブ・ラーニングの脳システムの知見を(MRI計測が困難な)幼児期・子ども期の発達段階でも活かすことができ、学齢期に相応しいAL教育の設計に役立てることが出来る。

【参考文献・資料】  
1 仁木和久, アタリイ・ラーニングの脳科学, 脳科学(脳研究), 主婦の友社, Vol.4, p.17-24(2012.10)  
2 Development of Human Brain Structural Networks Through Infancy and Childhood, *Cerebellum*, 2013, May; 25(5): 1299-1304  
3 Graybiel, Denise B. (2008). The adolescent brain. *Ann N Y Acad Sci*, 1124:117-26  
4 <http://www.aist.go.jp>, 2013, Dec 10; 2017, Dec 10; 2022, Apr 14  
5 <https://doi.org/10.1002/ajb.1400>, Age-related changes in the topological organization of the white matter structural connectome across the human lifespan  
6 <https://doi.org/10.1002/ajb.1400>, Phenotypic Neurodevelopmental Correlates