

# 脳情報学の方法論に基づく新しい脳データベース構築の提案

## A Proposal for Constructing a New Style Brain Database Based on Brain Informatics



鐘 寧 (Ning ZHONG, Dr. Eng.)

前橋工科大学生命情報学科教授

(Department of Life Science and Informatics Maebashi Institute of Technology)

人工知能学会 情報処理学会 IEEE シニアメンバー IEEE-CS IEEE-SMC IEEE-CIS ACM AAI 会員

受賞: Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD) Most Influential Paper Award (1999~2008) (2009) Best Paper Award of AMT (2006) The recipient of IEEE TCCI/ICDM Outstanding Service Award (2004) Best Research Meeting Paper Award of JSAI (2004) The recipients of two ACM's Recognition of Service Awards (2002)

著書: Web Intelligence Meets Brain Informatics, Springer, 2007 Web Intelligence Springer 2003 他 海外の学術書に関して共同執筆多数  
研究専門分野: データマイニング ウェブインテリジェンス 脳情報学など

**あらまし** 本研究では、これまで独立した立場から行われてきた脳研究に対し、脳を情報処理システムとみなす脳情報学の概念に基づき、従来の脳データのためのデータベースをより進化させ、体系的な統合を行うデータブレインの構築のための研究を行った。データブレインは、従来までのデータベースと異なり、データそのものではなくデータの概念を取り扱う。概念的データモデルであるデータブレインは、近年著しい発展を遂げているメタデータやオントロジーといったウェブインテリジェンスの技術を駆使して構築される。この脳情報学とウェブインテリジェンスの融合こそが、新時代における脳研究の重要なファクターであるといえる。

このデータブレインの研究がさらに進み、実データを伴った実装を実現することにより、個別に行われてきた従来の脳研究を体系的に統合し、分析やモデリングを支援し、高次脳認知機能の解明という目的を持ちながら、異なる分野の立場にあった研究者どうしの協力を可能とする研究基盤を確立することができる。さらに、これまでつながりの無かったデータや情報間から新たな知識の抽出の図ることが大いに期待される。

### 1. 研究の目的、狙い

脳は人体の中で最も複雑であり、謎の多いとされる臓器の一つである。脳が司る機能の一つとして、高次脳認知機能が挙げられる。例えば、人間は計算問題を解く際に、「視覚」を用いて問題文を読み、問題に対して「注意」を行い、数字を「記憶」するなどのプロセスを経て「計算」を行う。このように複数の要素から成る機能を高次脳認知機能と呼ぶ。この複雑な機能を解明するためには、一つの機能に限って研究するのではなく、それぞれに関連する機能全体に対して注目する必要がある。しかし、過去の研究では個々の機能のみに対して実験や分析が行われており、それらの研究結果を活用するためには、互いに関連付け、体系的に統合することが必要とされる。そこで、本研究では、認知心理学や脳神経科学など、独立した視点により得られた脳研究成果や臨床データを統合し、脳情報学に基づいた概念モデルであるデータブレインを考案し、脳研究のニーズに適応した新たな脳データベースのあり方について方法論をまとめる。

データブレインは、個別に行われてきた脳に関する研究を脳情報学に基づき、体系的に統合する概念的データモデルである。脳情報学とは、HIPS\*1という人間の脳を情報処理システムとみなす概念に基づき、マクロ的観測視点・ミクロ的観測視点から脳を体系的に研究する学問である。<sup>①</sup>脳情報学の四大方法論を以下に述べる。

1. 複雑な脳科学の問題に対する体系的な研究
2. 体系的な認知実験の設計と実施
3. 脳データの体系的な管理
4. 脳データの体系的な分析・シミュレーション

複雑な脳科学の問題に対する体系的な研究では、これまでの視覚・聴覚・触覚といった知覚中心の研究から、推論・計算・意思決定といった思考中心の研究へと脳研究がシフトしている状況において、時空間のミクロ的観測視点とマクロ的観測視点の融合がキーとなる。

思考中心の研究では、計算や推論のメカニズムや活動部位の時空間的特性に着目することが重要であり、時間的・空間的な変動が全体の人間の思考メカニズムに対してどのように連動して働いているのかを分析す

# 脳情報学の方法論に基づく新しい脳データベース構築の提案

## A Proposal for Constructing a New Style Brain Database Based on Brain Informatics

る必要がある。一方、認知症やうつ病などの高次脳認知機能に関する研究も欠かすことのできない重要な視点である。今日、これらの症状や病気による様々な社会的影響が問われており、研究の進展が強く期待されている反面、そのメカニズムは極めて複雑であり、より体系的な研究成果の取りまとめや横断的なデータや知識の整理が必要である。

体系的な認知実験の設計と実施では、実験間の関連性やつながりがポイントとなる。推論や計算といった高次脳認知機能を測るような実験は、1つの実験の中にあらゆる要素を含んでいると考えられる。そこで、従来の1目的1実験（1実験セット）の相対関係を発展させ、1実験を多目的に活用することを考慮して体系的な実験設計を実施し、単にその実験のみを考えて設計するのではなく、将来行われる関係深い実験への考慮や、脳研究・臨床現場のニーズを踏まえた実験設計を行うことも重要である。実験済みのものについては、関連する実験や得られた成果をどのように結び付けて互いに活用できるかが重要であり、そのための基盤作りが求められている。

脳データの体系的な管理では、近年多様化・高度化する脳研究や臨床現場において、管理するデータもまた複雑・大容量化しており、それらをいかにうまく管

理し活用していくのが重要となる。過去にとりためている有益なデータや知識、他の研究者が持っている関連する重要な情報などを、どのように組み合わせて今後を活用していくか、そのためのプロトタイプが求められており、本研究の大きな動機の一つともなっている。

脳データの体系的な分析・シミュレーションでは、**図1**に示されるような計測装置を用いて得られる、fMRI や脳波データといった複数の脳データを必要に応じて適切に利用し、連携をとって上手に相互活用することが重要となる。また、脳波データであれば、目的に応じて事象関連電位（ERP）や周波数データなどに加工し、多面的に分析を行うことも極めて重要である。さらに、近年注目されつつある認知アーキテクチャACT-Rなどのシミュレーションデータと、実データによる分析の組み合わせとなるフレームワークの実現も欠かすことができないキー技術である。

これらの問題に対し、データブレインという新たな概念を考案することにより、この4つの方法論を具現化することで、体系的な脳研究を行うための基盤をどのように構築し、脳研究の発展のために貢献することを本研究の狙いとする。



図1 非侵襲脳機能計測手法の代表であるfMRI計測装置とEEG

# 脳情報学の方法論に基づく新しい脳データベース構築の提案

## A Proposal for Constructing a New Style Brain Database Based on Brain Informatics

### 2. 研究の背景、同じ分野における国内外の研究動向

これまで本研究では、体系的な脳研究を行うための基盤となる脳データベースの開発を目標として様々なアイデアを検討した。しかし、脳機能の解明に用いられる fMRI<sup>\*2</sup>や EEG<sup>\*3</sup>によって得られたデータは形式が異なるため、既存のデータベースによって統合を行うことは困難である。例えば、時系列で考えた場合、EEG は計測チャンネルごとに一定のサンプリング間隔で記録された電位の変動が時系列データとして扱われるが、fMRI は数秒スケールの間隔で全脳部位に対する信号強度（最終的には画像データ）として扱われる。そのため、時間スケールと空間スケールの面で統一的にデータを扱うことが難しい。また、ACT-R などのシミュレーションデータとの相互活用となると、文字により記述されたデータと時空間上の数値データを照らし合わせることは容易ではない。それだけではなくデータや情報、文字による知識の管理も含めて、従来のリレーショナルデータベース等の技術による構築や統一的な管理は困難である判断した。

そこで着目したのが、データに関する情報を記述するメタデータ技術と、概念どうしの関係を表現するオントロジー技術である。これにより、データの概念関係の蓄積・モデリングを行う概念的データモデルを構築し、データ本体を格納するのではなく、データのメタデータを構築されたデータモデルに組み込み参照させることで、異なるデータの統合を目標とする。従って、研究の方向性を脳データベースから概念的データモデルであるデータブレインへと発展させることが、将来的な体系的脳研究の基盤づくりの実現により近づくと考えられる。

一方、これまで行われてきた高次脳認知機能の解明やうつ病の診断といった脳に関する研究は、人間の行動や心に基づく認知心理学や、神経回路の側面から脳を研究する脳神経科学、思考に影響を及ぼす脳内物質を調査する神経生理学などの単一の視点から行われてきた。研究により得られたデータや情報、知識は研究分野ごとに個別に扱われている。これらの研究結果を統合することにより、分野の異なる研究者どうしの協力が可能となる。しかし、現状では研究分野によって異なる形式や性質を持つ研究結果を統合する手段が確

立されていない。よって、脳研究を体系的に統合するデータブレインは非常に意義の大きいものであるといえる。

### 3. 研究の方法、研究の結果

データブレインの構築は、次の4つの段階に分けて行われる。(1) データブレインを構成する4つの次元の構築。(2) 各次元の統合。(3) 構築されたデータブレインと脳データの連結。(4) 各次元に与えられた機能の検証。

#### 3. 1 データブレインを構成する4つの次元の構築

データブレインは機能次元、実験次元、データ次元、分析次元の4つの次元から成り立つ。4つの次元は脳情報学の4大方法論と結びついており、各次元が連携することで体系的な脳研究を支援する。以下に各次元の詳細と構築方法について述べる。

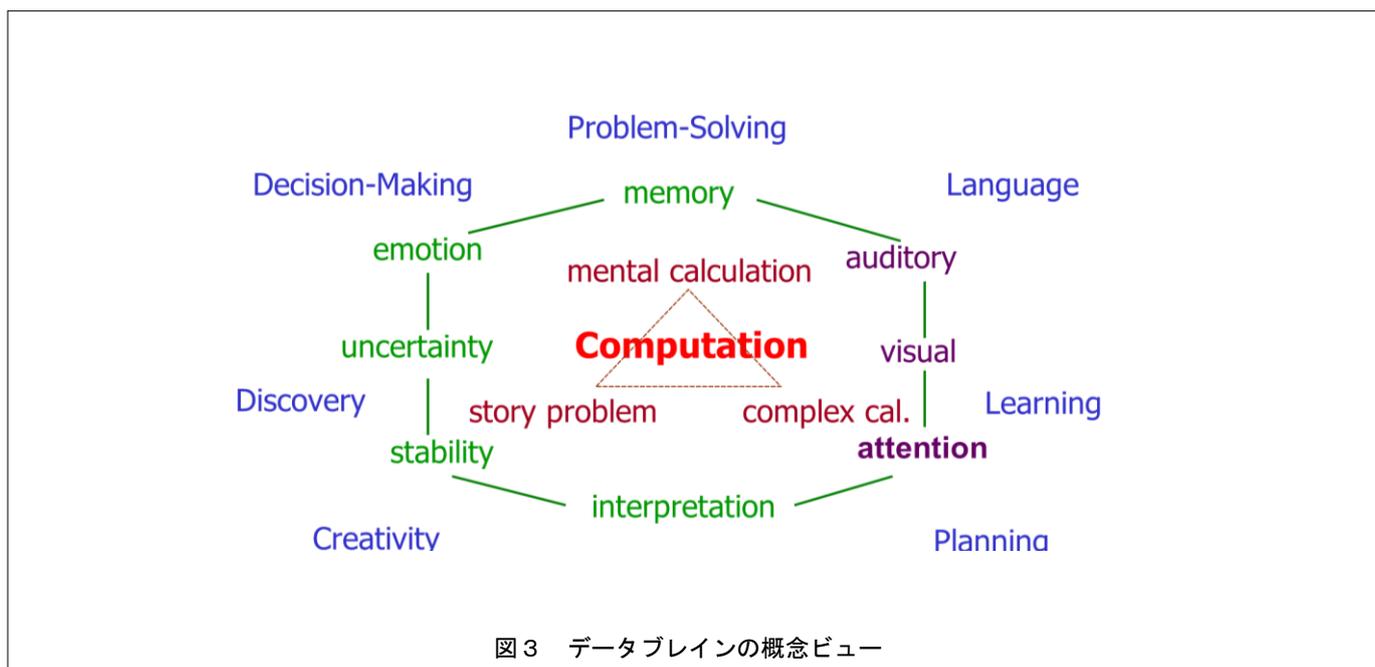
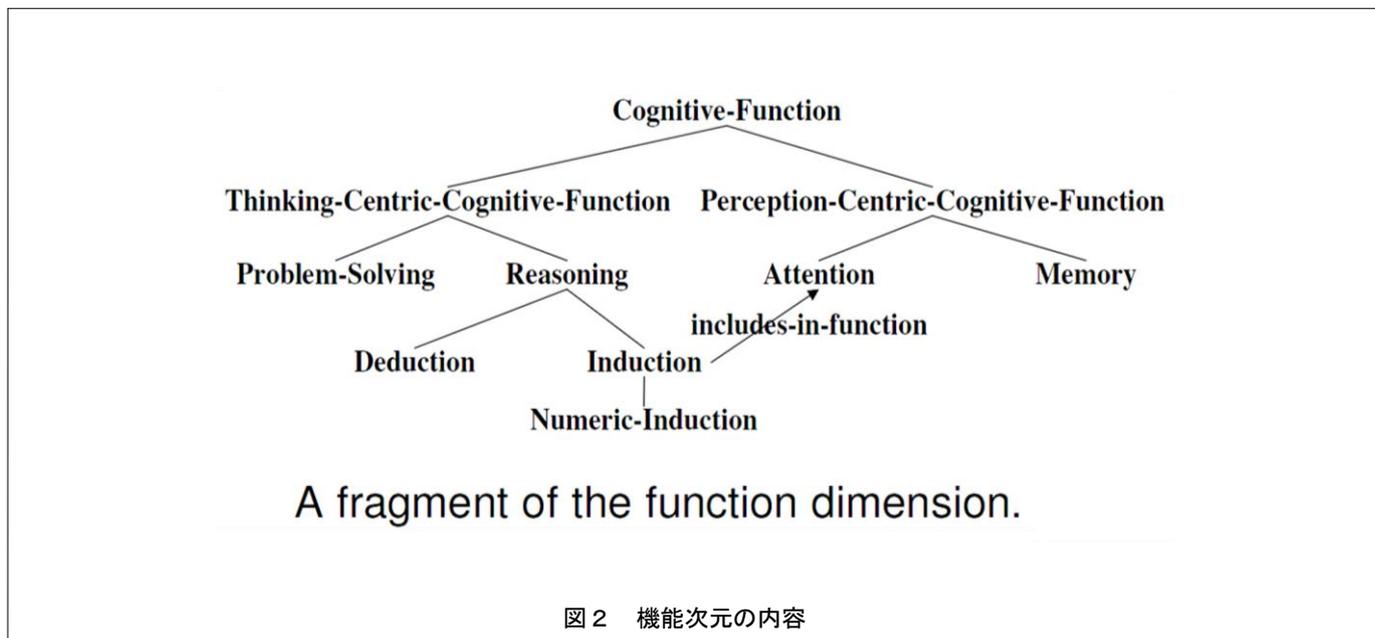
##### 3. 1. 1 機能次元の構築

機能次元は、脳情報学の方法論の一つである、「複雑な脳科学の問題に対する体系的な研究」の実現を目標とする。従来の研究では、推論や計算といった高次脳認知機能に対して個別に研究が行われているため、機能間関係について調べることは困難である。計算という高次脳認知機能を用いる際と、推論という高次脳認知機能を用いる際の両方で注意という要素認知機能が用いられるが、計算を中心とした注意という機能と推論を中心とした注意という機能は性質の異なるものとなる。

このような問題に対し、OWL<sup>\*4</sup>を用いて高次脳認知機能どうし関係をオントロジーとして記述することで、機能次元の構築を行う。尚、機能次元の内容は図2のようなになる。また、エージェントを用いてオントロジーから必要に応じた高次脳認知機能と、それに関連する認知機能群を明示する、図3に示されるような概念ビューの展開を行う。中心にある“Computation”（計算）が核となる高次脳認知機能に当たる。その周りに記されている“mental calculation, story problem, complex cal.”（暗算、文章題、複合計算）が高次脳認知機能を細かく分類したものとなる。さらに外側にあ

# 脳情報学の方法論に基づく新しい脳データベース構築の提案

A Proposal for Constructing a New Style Brain Database Based on Brain Informatics



る“memory, auditory, visual, attention, interpretation, stability, uncertainty, emotion”（記憶、聴覚、視覚、注意、解釈、安定性、不確定性、感情）は、高次脳認知機能を行うために用いられる要素認知機能を示す。最も外側にある“Problem-Solving, Language, Learning, Planning, Reasoning, Creativity, Discovery, Decision-Making”（問題解決、言語、学習、計画、推

論、創造、発見、意思決定）は高次脳認知機能に関連する別の高次脳認知機能を表す。この概念ビューの展開を行うために考案されたアルゴリズムを図4、図5に示す。概念ビューを提示することにより、人間の持つ様々な高次脳認知機能どうしのつながりを視覚化することにより、体系的な脳研究を支援することが期待される。

---

Conceptual View Extraction

---

**Input:** *Core* and *FD*.  
**Output:** *CV*.

1. Initialize empty concept sets *CV.CF*, *CV.CFIC* and *CV.RF*;
2. Set *CV.Core* = *Core*;
3. Set *CV.R* = {"parentClassOf", "includes-in-function", "related-to-in-function"};
4. *CV.CF* = *TDR*(*Core*, "parentClassOf",  $\infty$ , *FD*);
5. *CV.CFIC* = *TDR*(*Core*, "includes-in-function",  $\infty$ , *FD*);
6. *CV.RF* = *TDR*(*Core*, "related-to-in-function",  $\infty$ , *FD*);
7. return *CV*

---

図4 概念ビューの展開を行うアルゴリズム

---

Getting Traversal Directive Result: *TDR*

---

**Input:** *C<sub>st</sub>*, *R*, *n*, and *O*.  
**Output:** *Concepts*.

1. Initialize an empty set of result concepts, *Concepts*;
2. Initialize the depth of the traversal, *depth* = *n*;
3. If (*depth* == 0) then
4. return *Concepts*;
5. *depth<sub>next</sub>* = *depth*;
6. If (*depth<sub>next</sub>* <>  $\infty$ ) then
7. *depth<sub>next</sub>* = *depth<sub>next</sub>* - 1;
8. If (*R* == "parentClassOf") then
9. For each class *c<sub>i</sub>* in *O*
10. If (*c<sub>i</sub>* subClassOf *C<sub>st</sub>*) then
11. Add *c<sub>i</sub>* into *Concepts*;
12. Add *TDR*(*c<sub>i</sub>*, *R*, *depth<sub>next</sub>*, *O*) into *Concepts*;
13. End If
14. End For
15. Else
16. For each *Restriction* in *C<sub>st</sub>*
17. If (*Restriction* is a value constraint and its property name == *R*) then
18. *c<sub>i</sub>* = Range of *Restriction*;
19. Add *c<sub>i</sub>* into *Concepts*;
20. Add *TDR*(*c<sub>i</sub>*, *R*, *depth<sub>next</sub>*, *O*) into *Concepts*;
21. End If
22. End For
23. End If
24. return *Concepts*

---

図5 系列の異なる概念の横断的なマイニングアルゴリズム

# 脳情報学の方法論に基づく新しい脳データベース構築の提案

## A Proposal for Constructing a New Style Brain Database Based on Brain Informatics

### 3.1.2 実験次元の構築

実験次元は、脳情報学の方法論の一つである、「体系的な認知実験の設計と実施」の実現を目標とする。脳に関する実験には、特定の脳の機能に関連する部位を画像化する fMRI や、脳の活動に伴い発生する微弱な電気を捉える EEG といった、多様な計測装置が用いられる。実験内容についても、実験を行う目的、被験者の特徴、被験者に与える実験タスク、実験の環境といったような多くの要素が存在する。これらの要素の中から、目的に最もふさわしい要素を選び出し、実験プランを設計することで、初めて脳に関する有益なデータを得ることができる。

実験次元においても、OWL を用いて実験に関する要素が持つ特徴の関連性をオントロジーとして記述し、体系化を行う。実験次元における内容の例を図6に示す。実験タスクから実験器具に至るまで、実験と関わりを持つあらゆる情報を体系的に統合することが望ましい。

### 3.1.3 データ次元の構築

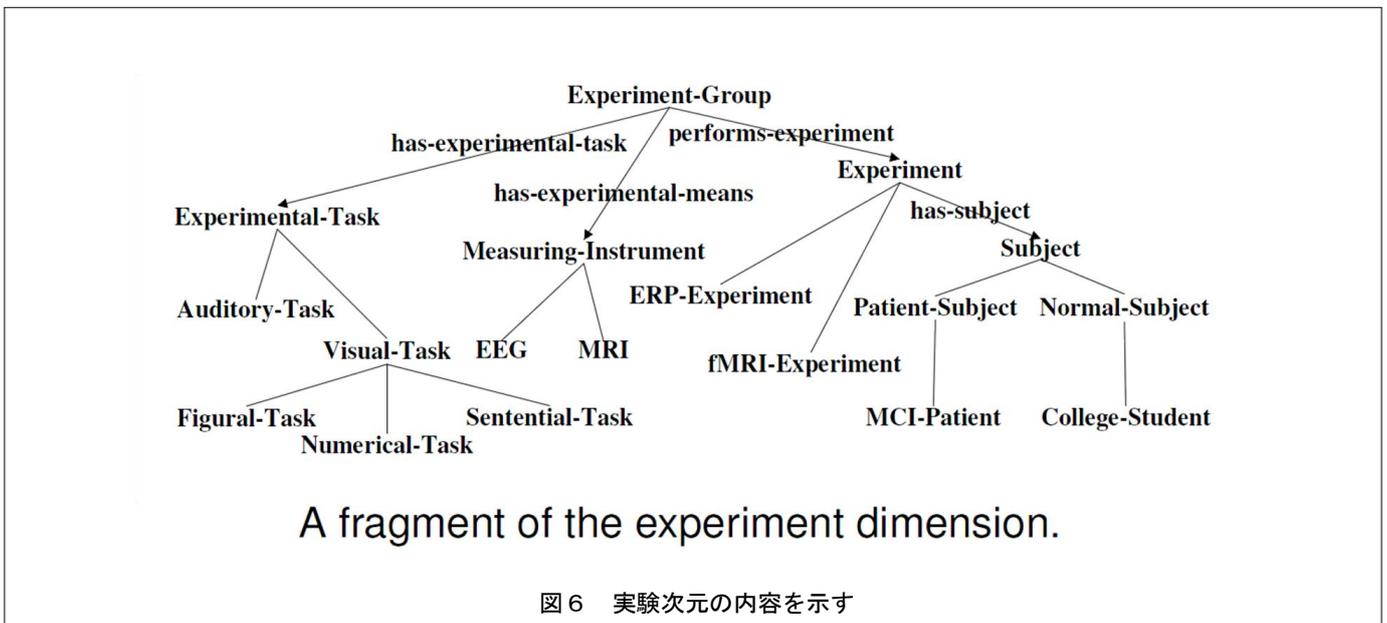
データ次元は、脳情報学の方法論の一つである、「脳データの体系的な管理」の実現を目標とする。脳データには fMRI データや、MEG データなど、複数の種類のデータが存在する。それらのデータは、目的に応じて様々な処理が行われ、利用者の望んだ形へと加工

される。このようにして得られた処理済みデータや処理前のデータは勿論、処理の視点を変えたデータも要求されるため、管理すべきデータは膨大な量となる。

これらのデータどうしの関係を OWL によって記述することで、データの体系的な管理を行うデータ次元を構築する。データ次元の内容を図7に示す。データの種類、処理の度合い、処理の視点といった要素ごとに分けて管理し、必要に応じて情報の粒度を調節されたデータを提供する。尚、データを直接データブレイン内に格納する方法を避け、データブレイン外に保存されたデータを参照させることで、異なるデータの管理を容易にするとともに、データの分散化を図る。さらには、データの形にとらわれないという性質を活かし、脳に関するデータのみに限らず、脳研究に関する論文を関連付けることで、知識ベースへの発展を図る。

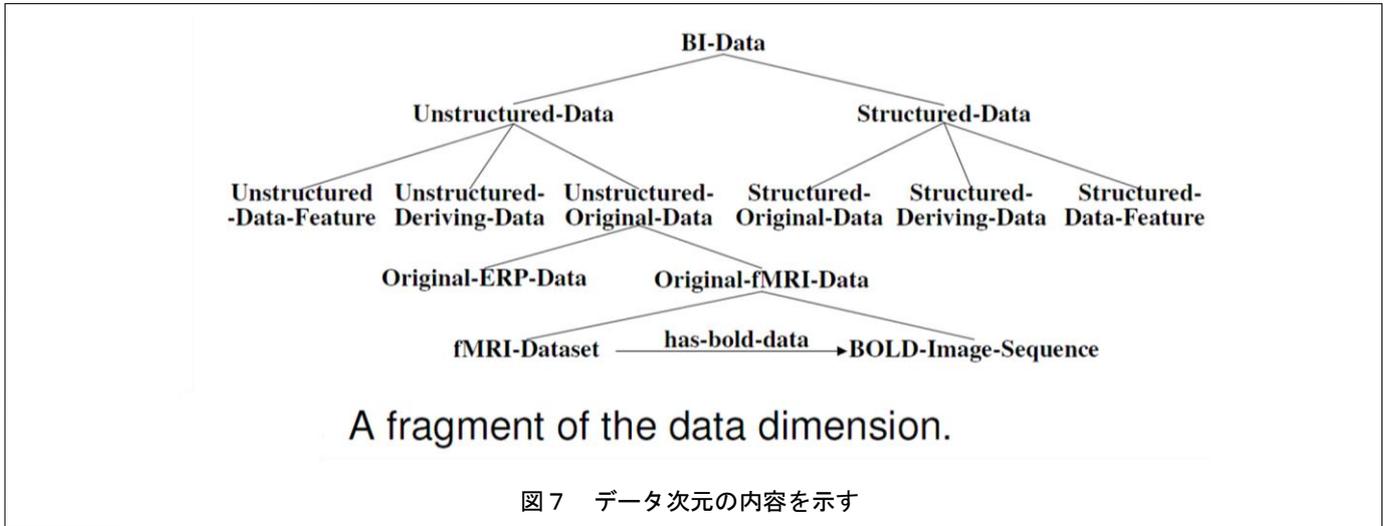
### 3.1.4 分析次元の構築

分析次元は、脳情報学の方法論の一つである、「脳データの体系的な分析・シミュレーション」の実現を目標とする。脳の研究は、神経回路に注目した脳神経工学や、脳をブラックボックスとして扱い、思考や心に注目した認知心理学などの複数の見地から行われる。また、近年における情報技術の進歩により、分析ツールや分析手法の数も増えつつある。これらの要因により、考え得る数多くの分析プランの中から、最適な分



# 脳情報学の方法論に基づく新しい脳データベース構築の提案

## A Proposal for Constructing a New Style Brain Database Based on Brain Informatics



析プランを選び出す必要がある。

OWL によって記述された分析ツールや分析タスク、過去の分析プランの関係概念を分析次元に格納する。分析次元の内容は図8のようになる。分析タスクや分析ツールの詳細、それらの関係を体系的に管理する。さらに、過去の分析から新しい分析プランの生成を行う機能を持つエージェントを実装することで、分析次元の構築を行う。

得られたかを知るためには実験次元にアクセスする必要がある。また、データが経た分析過程を知るためには分析次元にアクセスする必要がある。このように、データブレインの各次元は連携して動作する必要がある。

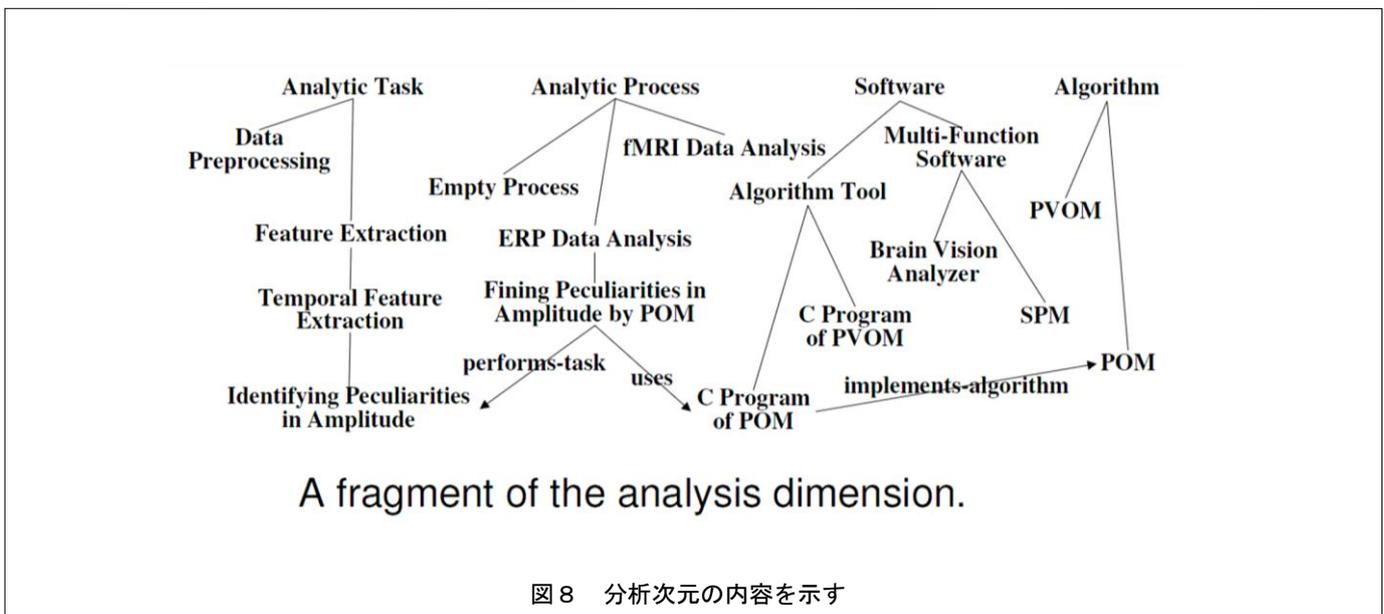
そのため、各次元の概念に対し、他の次元との関わりを記述することで、次元の独立を避け、連携を図る。図9の構造ビューに示されるような形が、4つの次元の理想の形となる。

### 3.2 各次元の統合

上記の方法で実装された各次元を統合する。データ次元内において、あるデータがどのような実験を経て

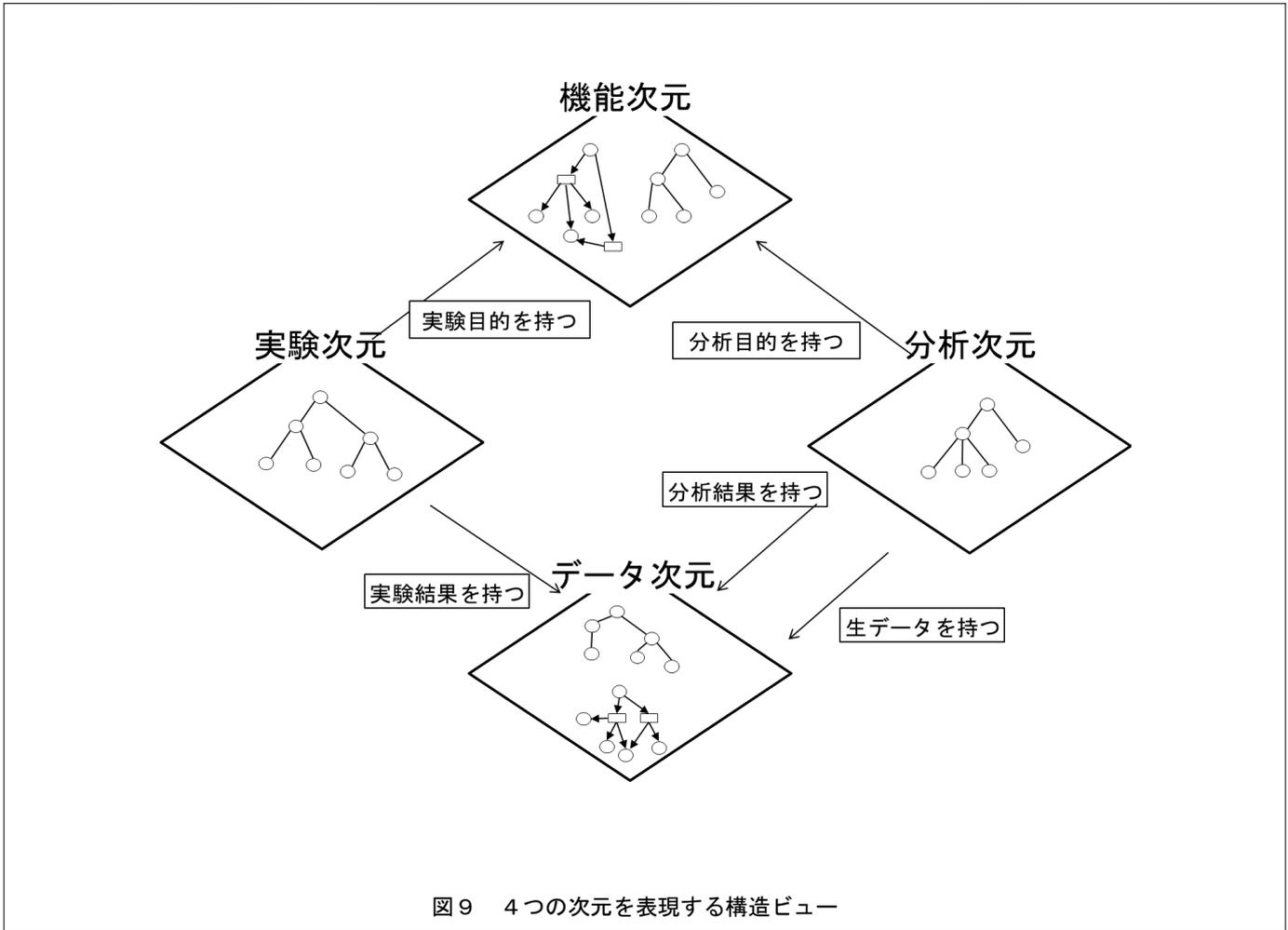
### 3.3 データブレインと脳データの連結

構築されたデータブレインと蓄積された脳データを連結する際に、BI provenances と呼ばれるメタデー



# 脳情報学の方法論に基づく新しい脳データベース構築の提案

## A Proposal for Constructing a New Style Brain Database Based on Brain Informatics



タを用いる。BI provenances とは、データの出所を述べたメタデータである。BI provenances は、データがどのような実験によって得られたかを記す data provenances と、データに対しどのような分析が行われたかを記す analysis provenances の二つに分類される。この BI provenances は図10のように付与されることで、データブレインと脳データの橋渡しの役割を果たす。このメタデータである BI provenances を付与するために、特定の情報に対してメタデータを付与するフレームワークである RDF<sup>5</sup>を用いる。この技術を用いてデータブレインと外部にある脳データを結び付け、互いに関連付ける。データブレイン内で扱われる脳データは、データそのものではなくデータ概念であるため、膨大な数の分散化されたデータに対しても、何の支障もなく利用することができる。

### 3. 4 機能の検証

データブレインは体系的な脳情報学の支援を行うため、以下の4つの機能を有する。

1. 体系的に高次脳認知機能や脳機能間の関連性を示す概念モデルの提供を行う。
2. 過去の実験設計や実験特性、計測装置などを管理し、新たな実験設計を支援する。
3. 利用者の要求に応じた粒度の調節により、必要に応じたデータを提供する。
4. 過去の分析に基づく新たな分析プランを提示する。

これらの機能が適切なものであることを確かめるため、推論や問題解決といった高次脳認知機能や、うつ病を代表とした臨床脳データに対してデータブレインの適用を行う必要がある。また、脳研究は日々進歩を続けており、新たな脳に関する事実が次々と明らかに

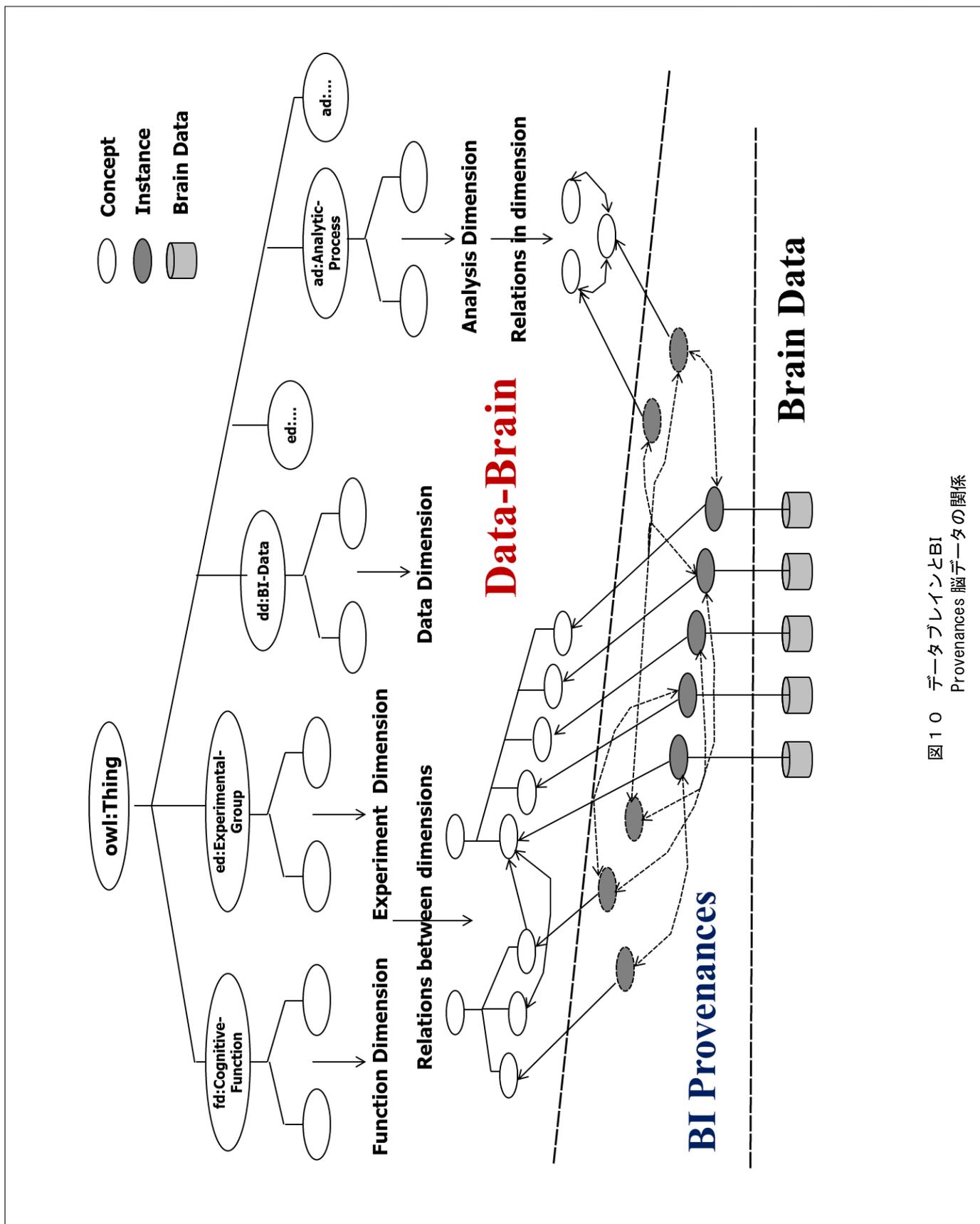


図 10 データブレインとBI Provenances 脳データの関係

# 脳情報学の方法論に基づく新しい脳データベース構築の提案

## A Proposal for Constructing a New Style Brain Database Based on Brain Informatics

なっている。このような最新の情報をデータブレインに取り入れ、適応していくことで脳研究の最前線での実用化を図る。

### 4. 将来展望・将来における応用分野

本研究では、従来のデータベース技術とは異なり、メタデータやオントロジーといったウェブインテリジェンスの技術を駆使した脳データのためのデータベースについて、体系的な統合を行うデータブレインの構築のための研究を行い、方法論をとりまとめるに至った。現在は、本研究で考案したデータブレインの実装に向けて準備を進めており、実装後には、実際の fMRI や EEG などの脳データや、複数の実験に関する情報などを伴った運用テストを行い、さらなる改善を実施する予定である。

将来データブレインが完全な形で完成し、実践的な運用段階に入った場合、人間の持つ様々な高次脳認知機能どうしのつながりを視覚化することができ、膨大なデータから、必要に応じて調整されたデータを選び出し、利用者に提供することが可能となる。さらに様々な実験により、膨大な脳データを収集し、管理、モデリング、分析のための知識をまとめ、具体的に分析プランを立てることも可能となり、過去の分析をもとに、目的に合わせた新しい分析プランの提供を行うことができるようになる。

また、データブレインの研究開発が今後進むことで、異なる分野の研究者が協力して研究を行うための基盤が完成できる。思考を中心とした高次脳認知機能の解明が進むことで、認知心理学や人工知能の開発、さらには近年問題となりつつある認知症やうつ病の診断など、人間の心に関する研究分野の発展に大きく貢献することが期待される。また、データの利用目的に応じて情報の粒度を調整する機能や既存の分析手法を基に新たな分析プランを提供するシステムは、高次脳認知機能の解明に限らず、複雑なデータを取り扱う様々な分野にも応用することができると考えられる。

### 用語解説

\*1 **HIPS**: Human Information Processing System、人間の脳を情報処理システムとみなす概念。

\*2 **fMRI**: functional Magnetic Resonance Imaging、核磁気共鳴現象を利用し、脳の活動に伴った血流の反応を視覚化することで脳の機能を調べる技術。

\*3 **EEG**: Electro Encephalo Graphy、脳の活動に伴って生じる電気活動を捉える技術。

\*4 **OWL**: Web Ontology Language、オントロジーを記述するための言語。RDF の語彙拡張でもある。

\*5 **RDF**: Resource Description Framework、URI と呼ばれる識別子を用いてデータの詳細情報を表現するためのフレームワーク。

### 参考文献、関連文献

- (1) N. Zhong, J.M. Bradshaw, J. Liu, J.G. Taylor (eds.): Special Issue on Brain Informatics, *IEEE Intelligent Systems*, **26(5)**, (2011).
- (2) N. Zhong, J. Chen: Constructing a New-Style Conceptual Model of Brain Data for Systematic Brain Informatics, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, doi:10.1109/TKDE.2011.139, (2011)
- (3) G. Jin, K. Li, Y. Hu, Y. Qin, X. Wang, J. Xiang, Y. Yang, J. Lu, N. Zhong: fMRI Study of Problem Solving in Posterior Cingulate and Adjacent Precuneus Cortex in Patients with Amnesic Mild Cognitive Impairment, *Radiology*, (in press).
- (4) J. Chen, N. Zhong, and P.P. Liang: Data-Brain Driven Systematic Human Brain Data Analysis: A Case Study in Numerical Inductive Reasoning Centric Investigation, to be published in *Cognitive Systems Research*, Elsevier, (2010), doi:10.1016/j.cogsys, (2010). 12.014.
- (5) N. Zhong and S. Motomura: Agent-Enriched Data Mining: A Case Study in Brain Informatics, *IEEE Intelligent Systems*, **24(3)** 38–45, (2009)
- (6) J. Zhao, S. Sahoo, P. Missier, A. Sheth, C. Goble: Extending Semantic Provenance into the Web of Data, *IEEE Internet Computing*,

## 脳情報学の方法論に基づく新しい脳データベース構築の提案

### A Proposal for Constructing a New Style Brain Database Based on Brain Informatics

- 15(1)** 40-48, (2011).
- (7) I. Astrova: Reverse Engineering of Relational Database to Ontologies, *Proc. the ESWC* 327-341, (2004).
  - (8) D. Beneventano, S. Bergamaschi, F. Guerra, and M. Vincini: Synthesizing an Integrated Ontology, *IEEE Internet Computing*, **7(5)**, 2-51, (2003).
  - (9) P. Chen: The Entity-Relationship Model-Towards a Unified View of Data, *ACM Transactions on Database Systems*, **1(1)**, 9-36, (1976).
  - (10) M. Jarrar, J. Demey, and R. Meersman: On Using Conceptual Data Modeling for Ontology Engineering, *Journal of Data Semantics*, **1(1)**, 185-207, (2003).
  - (11) J. Zhao, S. Sahoo, P. Missier, A. Sheth, C. Goble: Extending Semantic Provenance into the Web of Data, *IEEE Internet Computing*, **15(1)**, 40-48, (2011).
  - (12) X. Jia, P. Liang, J. Lu, Y. Yang, N. Zhong, K. Li: Common and Dissociable Neural Correlates Associated with Component Processes of Inductive Reasoning, *NeuroImage*, **56**, 2292-2299, (2011).

この研究は、平成19年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成20年度～22年度に実施されたものです。