

第13回全脳アーキテクチャ勉強会 2016/3/15

「脳全体」の機能に迫る

～機能的神経結合に基づく認知情報処理解明に向けて～

東京大学大学院

新領域創成科学研究科先端生命科学専攻

倉重 宏樹

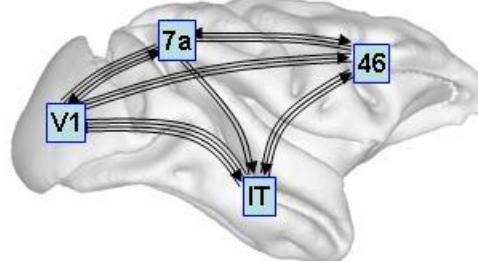
h.kura00@gmail.com

@hir_kurashige (Twitter)

全脳コネクティビティ

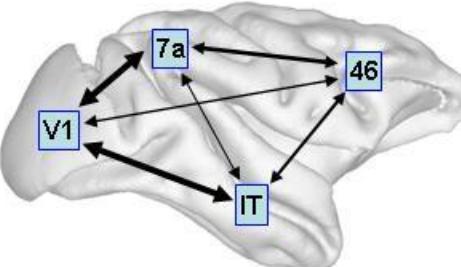
解剖学的結合

structural connectivity



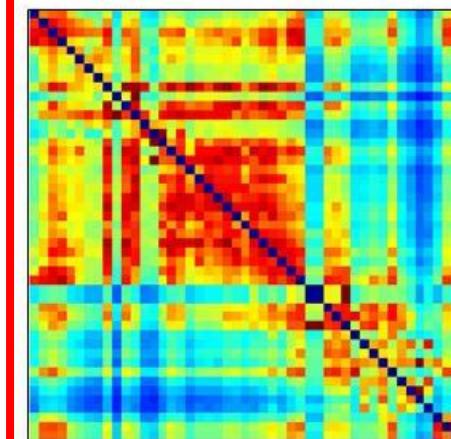
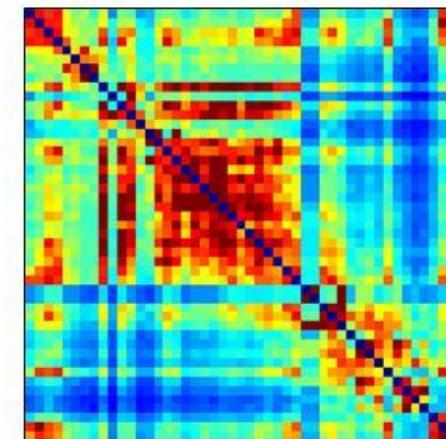
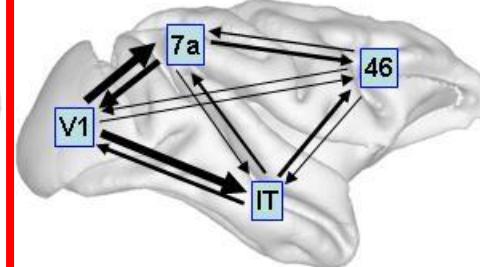
機能的結合

functional connectivity



因果的結合

effective connectivity



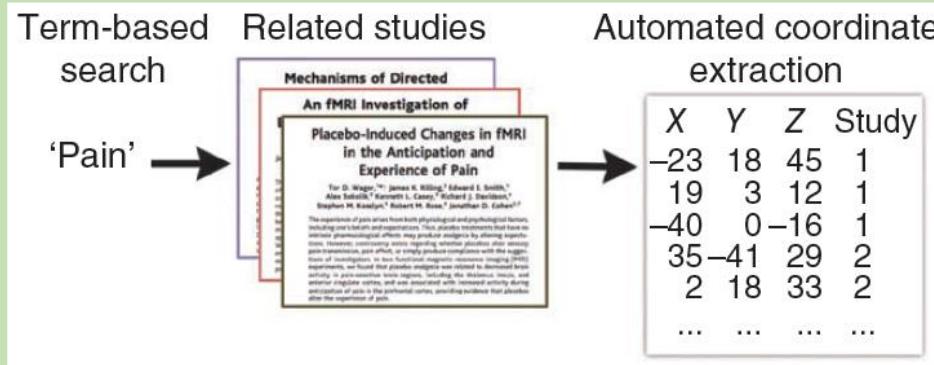
Sporns (2007) Scholapedia

本講演では、主にresting-state functional connectivity (RSFC; 安静時の機能的脳結合)を用いたネットワーク解析について話す。

認知機能に基づく脳の分割

Neurosynthデータベース：

- <http://neurosynth.org/>
- 11406本(2016/3/13現在)のfMRI論文が登録.
- アブストラクト(Pubmed ID)と脳賦活部位の座標を紐づけ可能, つまり認知機能語の出現と脳賦活の有無の相関を知れる.

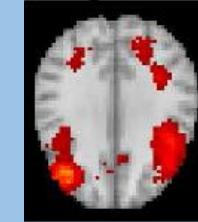


Yarkoni et. al (2011) Nat. Methods

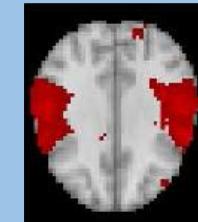
今回実際に再構成した
cognitive mapの一例



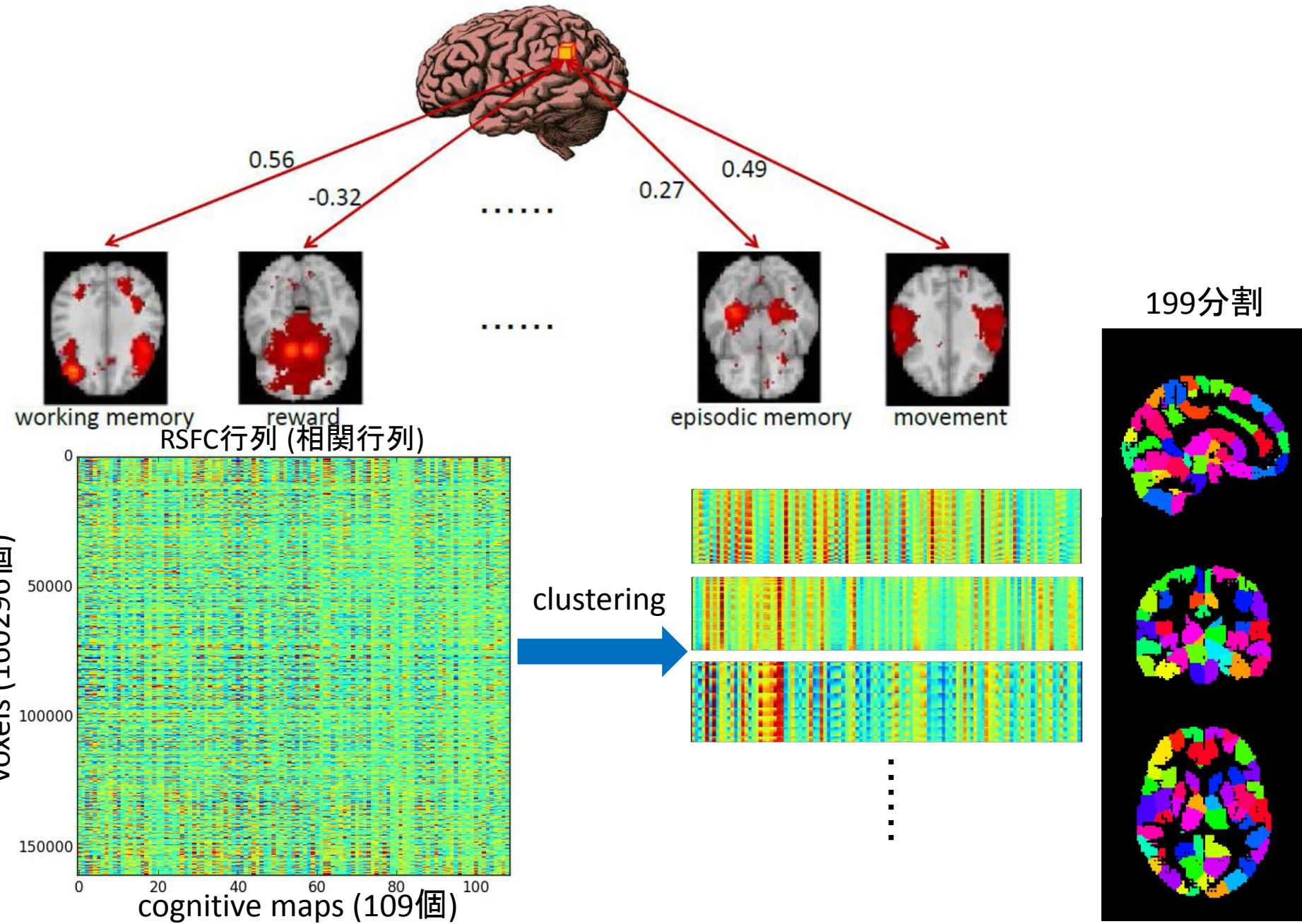
working memory



movement



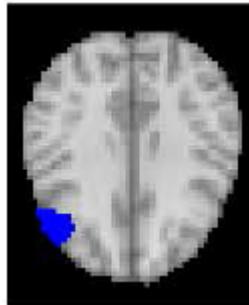
認知機能に基づく脳の分割



認知機能に基づく脳の分割

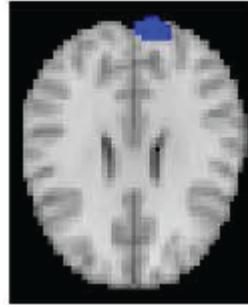
109個の認知機能との連関度をラベルに持つ199個のparcelsを得る。

parcel 4



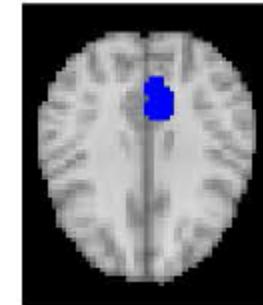
uncertainty 0.412
prospective memory 0.365
reasoning 0.351
intelligence 0.339
cognitive control 0.323
planning 0.271
deception 0.264
response inhibition 0.26
belief 0.234
rule 0.234

parcel 25



mental imagery 0.488
spatial attention 0.399
search 0.394
visual search 0.383
navigation 0.382
visual attention 0.339
emotion regulation -0.322
selective attention 0.299
empathy -0.292
uncertainty -0.281

parcel 120

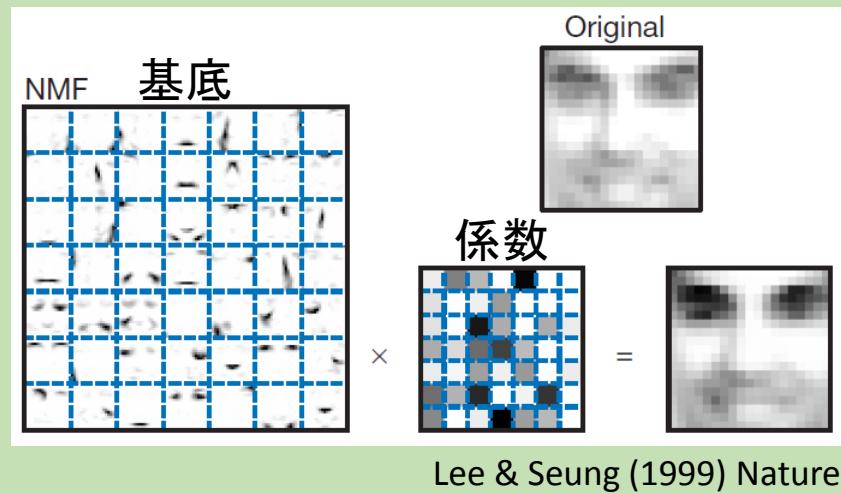


default mode network 0.466
autobiographical memory 0.447
familiarity 0.431
memory 0.407
episodic memory 0.401
retrieval 0.383
thought 0.351
belief 0.35
theory of mind 0.35
narrative 0.323

Nonnegative Matrix Factorizationによる次元削減

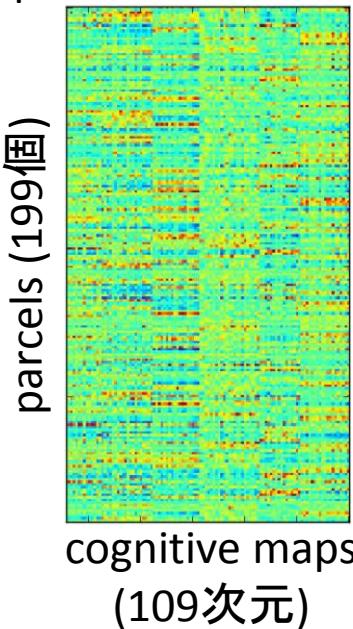
Nonnegative Matrix Factorization (NMF):

非負行列を非負基底行列と非負係数行列に分解する。共起する成分を基底として抽出できる。右の例だと目にあたる成分や口にあたる成分などが抽出されている。

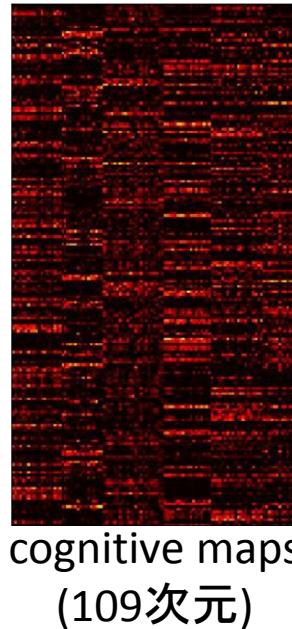


Lee & Seung (1999) Nature

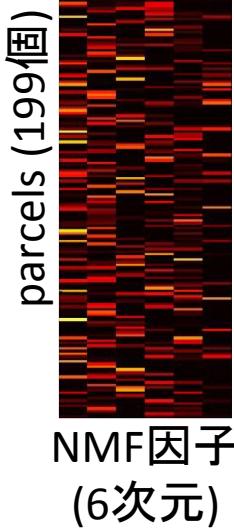
parcelsのラベル行列



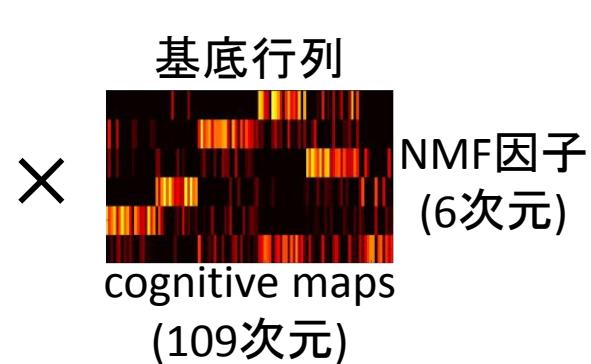
≥ 0



係数行列



\approx



基底行列

NMF俦子
(6次元)

Nonnegative Matrix Factorizationによる次元削減

各基底ベクトルの上位10成分：

Factor 0 (概念処理)	
comprehension	0.248
narrative	0.245
concept	0.244
judgment	0.227
metaphor	0.221
theory of mind	0.211
inference	0.204
belief	0.204
intention	0.202
semantic processing	0.191

Factor 1 (運動・表出)	
movement	0.329
motor imagery	0.314
speech production	0.302
skill	0.283
speech perception	0.256
motor control	0.245
melody	0.235
integration	0.226
prosody	0.213
listening	0.207

Factor 2 (視覚・注意)	
mental imagery	0.342
spatial attention	0.333
visual search	0.329
search	0.317
object recognition	0.252
attention	0.242
gaze	0.241
face perception	0.223
selective attention	0.218
navigation	0.204

Factor 3 (実行機能)	
cognitive control	0.303
rule	0.291
working memory	0.289
planning	0.288
maintenance	0.276
response inhibition	0.241
expectancy	0.224
task switching	0.216
decision	0.210
deception	0.198

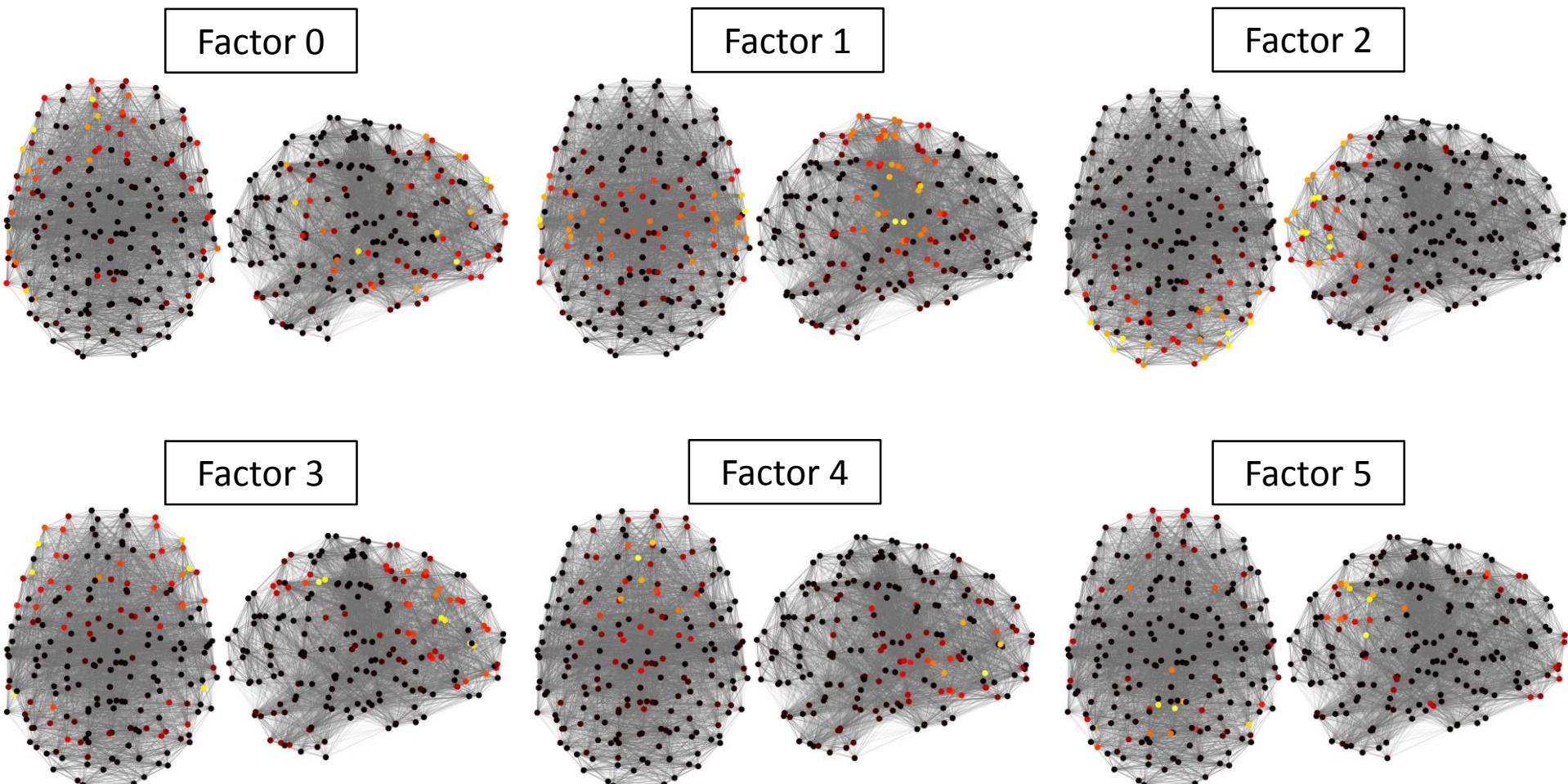
Factor 4 (価値判断)	
reward	0.320
anticipation	0.270
fear	0.263
arousal	0.261
choice	0.255
decision making	0.233
loss	0.229
risk	0.225
stress	0.224
eating	0.202

Factor 5 (記憶)	
episodic memory	0.342
default mode network	0.302
memory	0.293
autobiographical memory	0.278
memory retrieval	0.266
remembering	0.264
retrieval	0.264
thought	0.262
familiarity	0.254
prospective memory	0.195

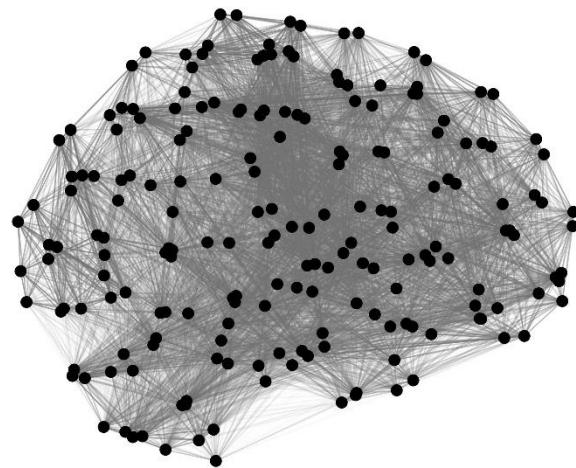
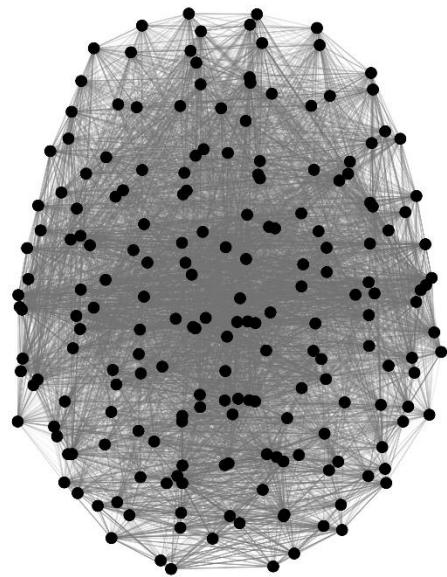
Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

Nonnegative Matrix Factorizationによる次元削減

各parcelの位置とNMF係数の大きさ:



Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------



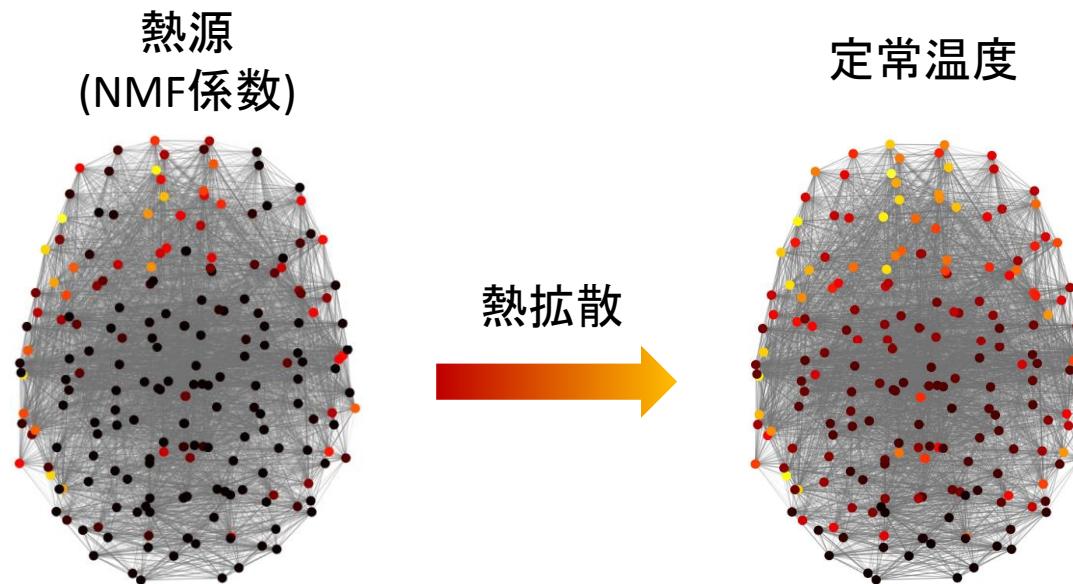
Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

情報収集源の多様性

目的:

各parcelがどれくらい多様な情報源から情報を収集しているか、さらに情報収集源の多様性とparcelが担う認知機能に関係があるかを調べる。

各parcelの持つNMF係数を、そこから発生する熱の大きさとみなし、熱拡散により得られる定常温度をそのNMF因子から伝わる情報の大きさとみなす。



Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

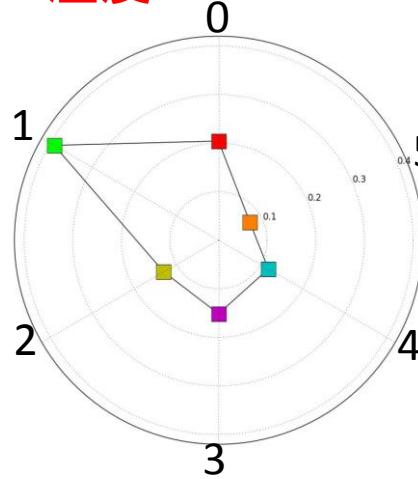
情報収集源の多様性

目的:

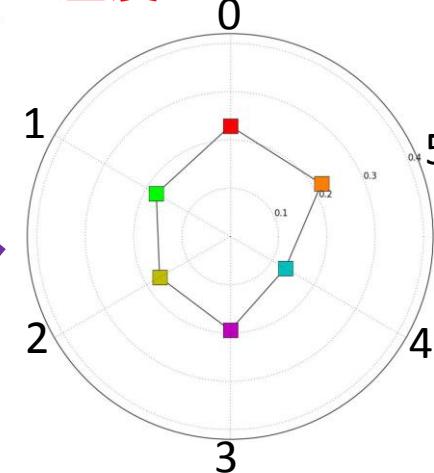
各parcelがどれくらい多様な情報源から情報を収集しているか、さらに情報収集源の多様性とparcelが担う認知機能に関係があるかを調べる。

情報源の多様性をGini係数で表す。[0,1]の値を取り、多様なほど小さい。

温度 Gini = 0.290



温度 Gini = 0.097



Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

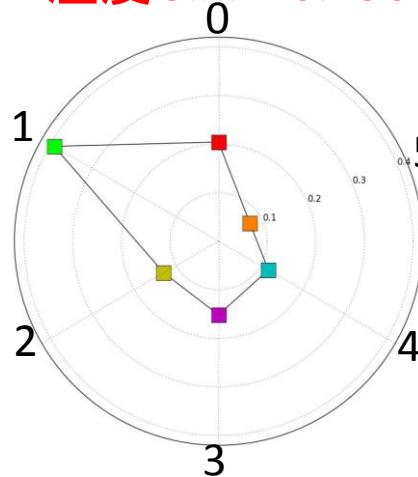
情報収集源の多様性

目的:

各parcelがどれくらい多様な情報源から情報を収集しているか, さらに情報収集源の多様性とparcelが担う認知機能に関係があるかを調べる.

情報源の多様性をGini係数で表す. [0,1]の値を取り, 多様なほど小さい.

温度 Gini = 0.290

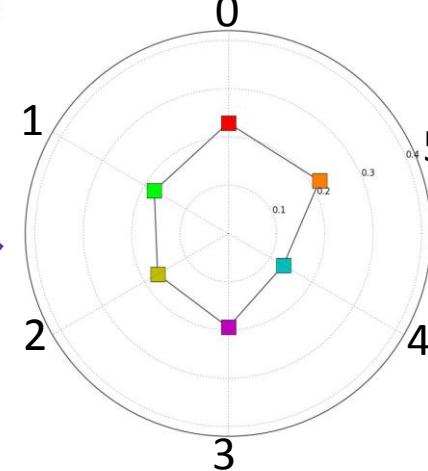


Gini小



Gini大

温度 Gini = 0.097



Factor 0
(概念処理)

Factor 1
(運動・表出)

Factor 2
(視覚・注意)

Factor 3
(実行機能)

Factor 4
(価値判断)

Factor 5
(記憶)

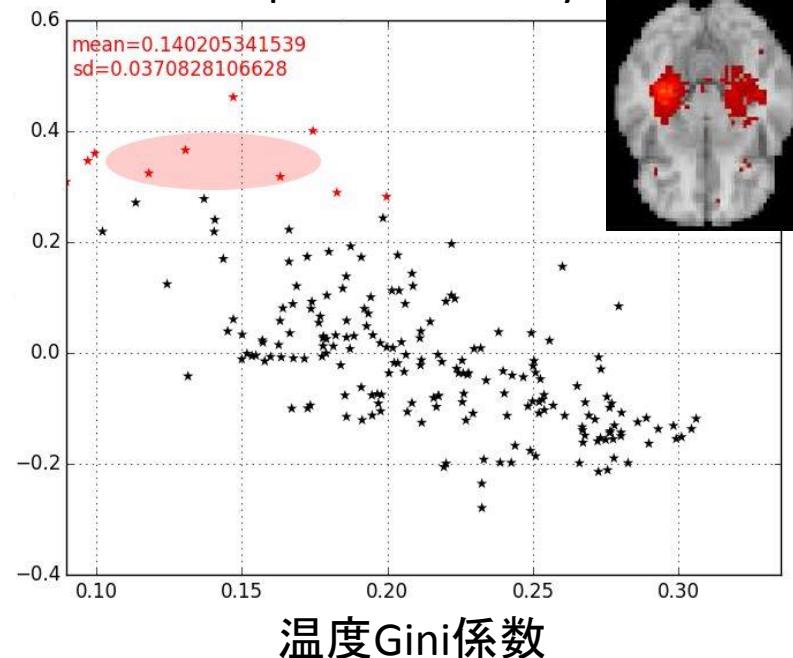
情報収集源の多様性

目的:

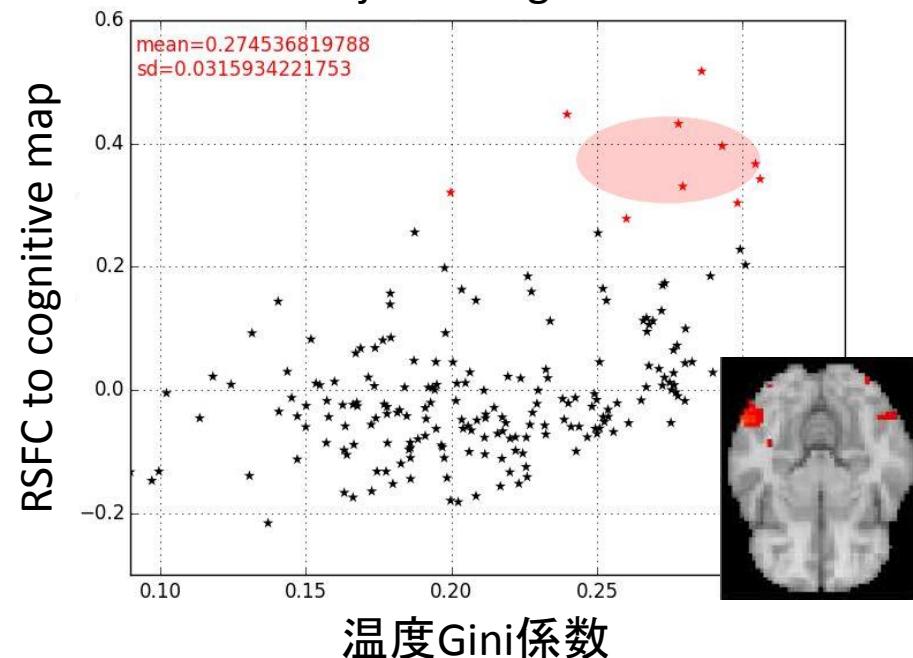
各parcelがどれくらい多様な情報源から情報を収集しているか、さらに情報収集源の多様性とparcelが担う認知機能に関係があるかを調べる。

各cognitive mapとparcelsのRSFCを求め、上位10個のparcelsについてその平均Gini係数を算出し、それをその認知機能の情報収集源多様性の指標とする。

episodic memory



object recognition

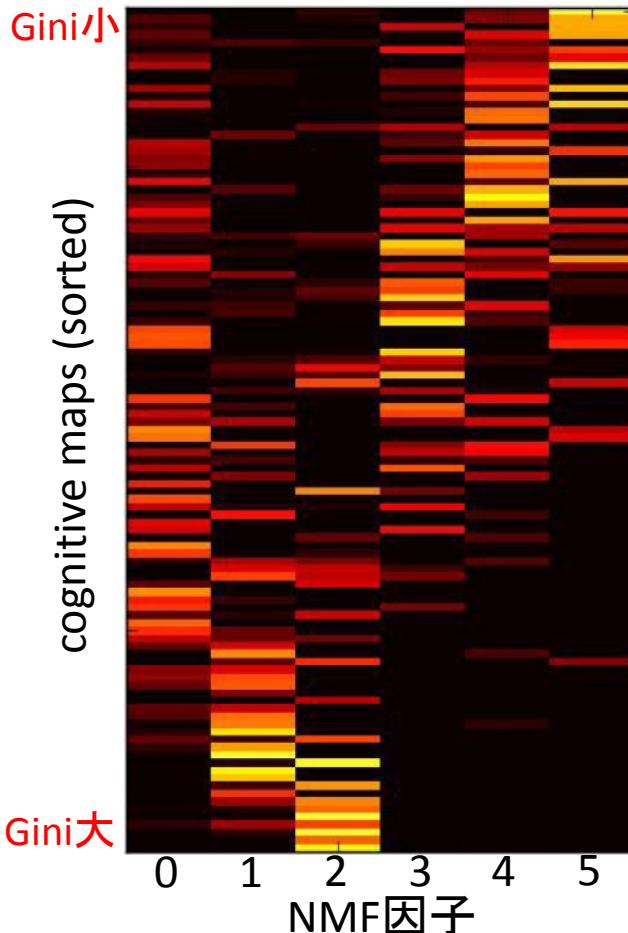


Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

情報収集源の多様性

目的:

各parcelがどれくらい多様な情報源から情報を収集しているか、さらに情報収集源の多様性とparcelが担う認知機能に関係があるかを調べる。



NMFの基底行列を平均Gini係数が低い順(=情報収集源の多様性が高い順)にソートした。

この図から、Factor 5(記憶)が最も多様な情報源から情報を集めており、次いでFactor 4(価値判断)、Factor 3(実行機能)の順に多様で、反対にFactor 1(運動・表出)、Factor 2(視覚・注意)は多様性が低いことがわかる。

Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
Low	Low	Low	Low	High	Very High

ネットワークのクラスタ性と認知機能の関係

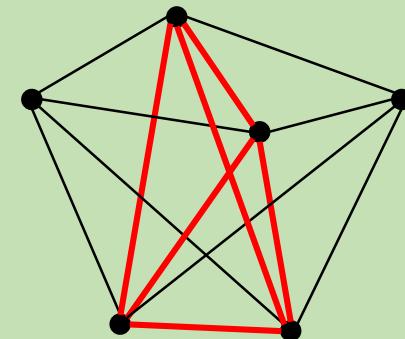
目的:

ネットワークの局所的なクラスタ性の強さと認知機能の関係を調べる.

Clique percolation法 (Palla et al. (2005) Nature):

cliqueのノード数kを設定し, あるk-cliqueとほかのk-cliqueが(k-1)-cliqueを共有していたとき, それらをつなないで一つのクラスタとする. これを繰り返してクラスタを拡張していく.

kを上げていくと, 強いクラスタ性を持つ部分ネットワークが浮かび上がってくる.

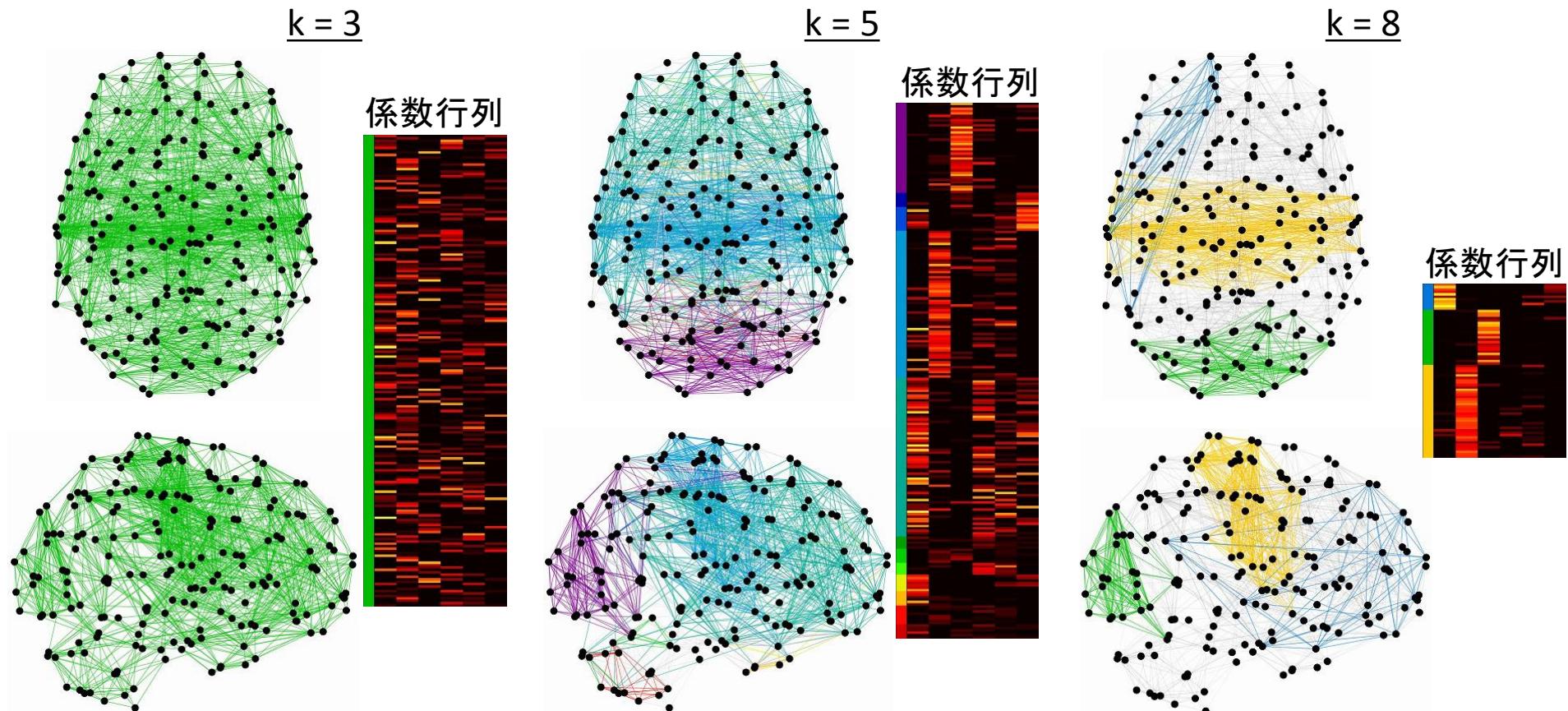


Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

ネットワークのクラスタ性と認知機能の関係

目的:

ネットワークの局所的なクラスタ性の強さと認知機能の関係を調べる.



視覚・注意にかかるネットワーク, 運動・表出にかかるネットワーク,
および概念処理にかかるネットワークが, 強いクラスタ性を持っている.

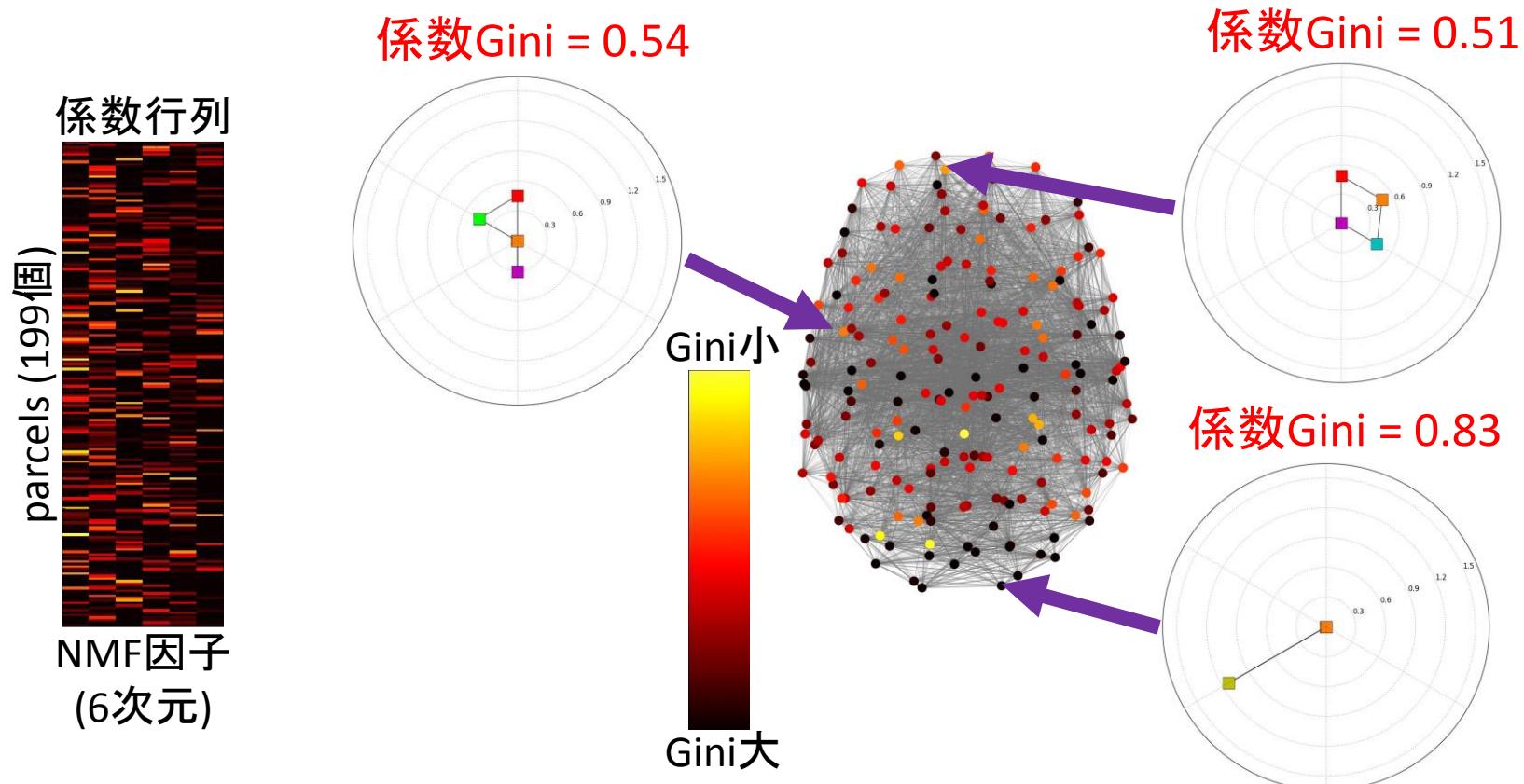
Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

巨視的認知情報処理と微視的認知情報処理

目的:

認知情報処理における“粒度”を考察する.

一つの因子に特化したparcelsがある一方、複数のNMF係数で大きな値を取る、複数のNMF因子に関連するparcelsが少なからずある。



Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

巨視的認知情報処理と微視的認知情報処理

目的:

認知情報処理における“粒度”を考察する。

複数のNMF因子に関連するparcelsをどのように解釈すればよいか？

解釈1:

```
func() {  
    subfunc1();  
    subfunc2();  
    :  
}  
subfunc1() {  
    subsubfunc1();  
    subsubfunc2();  
    :  
}
```

一般的に, funcよりsubfuncが, subfuncよりsubsubfuncの方が汎用的で, 様々な関数から呼び出される(様々な機能に関与する)。これと同様に, 多数の因子に関与するparcelは, 汎用的に使われる粒度の小さい機能を有する。

解釈2:

多数の因子に関与するparcelは, 多数の要因が組み合わさった特別な状況での情報処理を担う。つまり粒度の大きい機能を有する。

Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

巨視的認知情報処理と微視的認知情報処理

目的:

認知情報処理における“粒度”を考察する。

複数のNMF因子に関連するparcelsをどのように解釈すればよいか？

解釈1:

```
func() {  
    subfunc1();  
    subfunc2();  
    :  
}  
subfunc1() {  
    subsubfunc1();  
    subsubfunc2();  
    :  
}
```

一般的に, funcよりsubfuncが、subfuncよりsubsubfuncの方が汎用的で、様々な関数から呼び出される(様々な機能に関与する)。これと同様に、多数の因子に関与するparcelは、汎用的に使われる粒度の小さい機能を有する。

解釈2:

多数の因子に関与するparcelは、多数の要因が組み合わさった特別な状況での情報処理を担う。つまり粒度の大きい機能を有する。

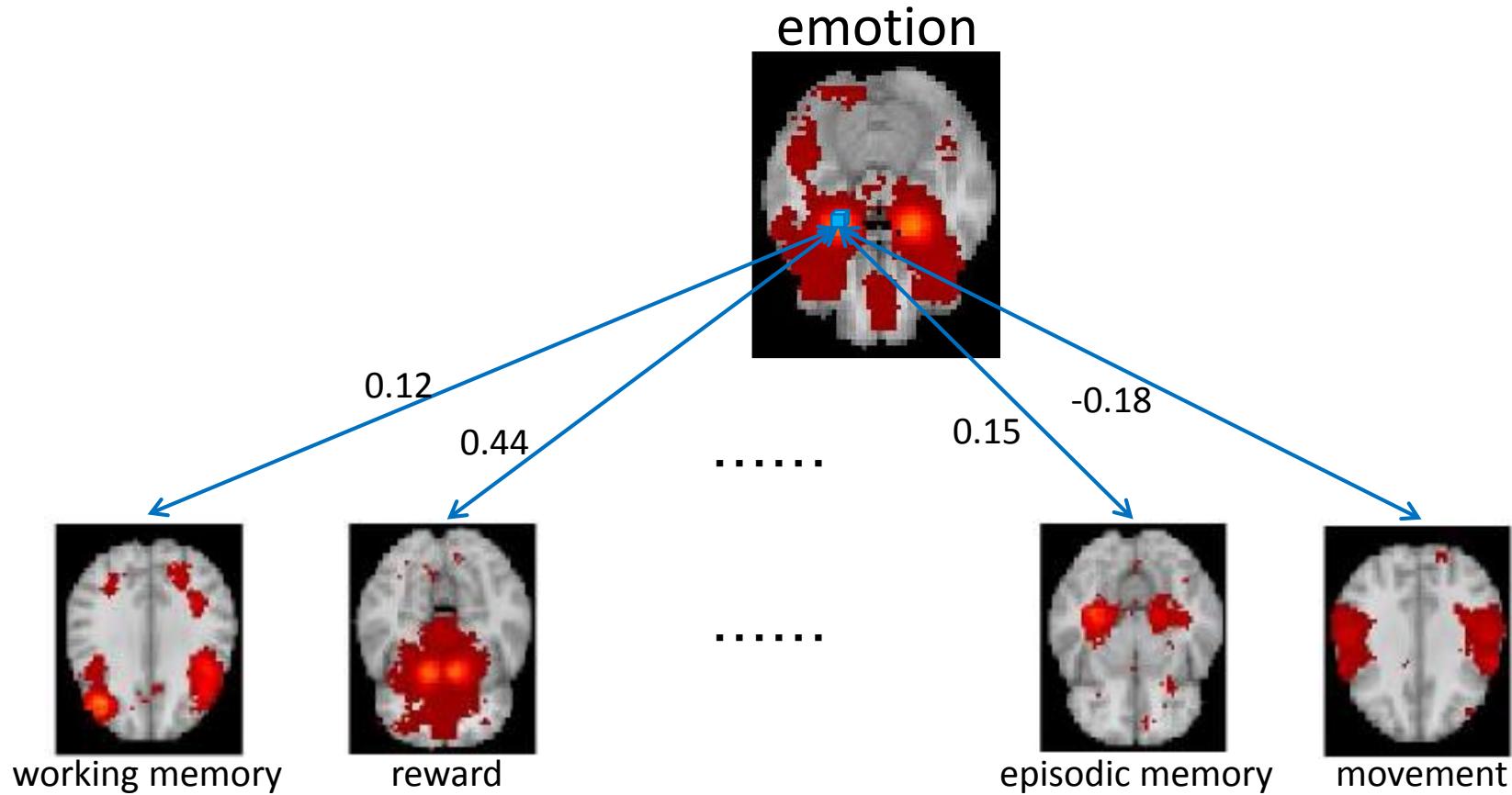


Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

脳の機能的結合に基づく認知機能概念の概念分析

目的:

各認知機能について、そのcognitive mapを構成するvoxelsとほかの認知機能のcognitive mapsとのRSFCを測り、それをもとに認知機能を細分化して分析する。



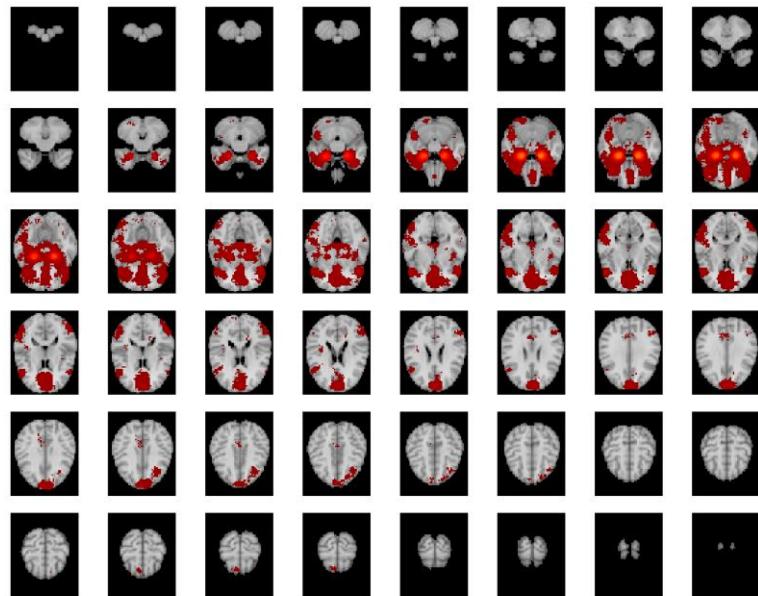
脳の機能的結合に基づく認知機能概念の概念分析

目的:

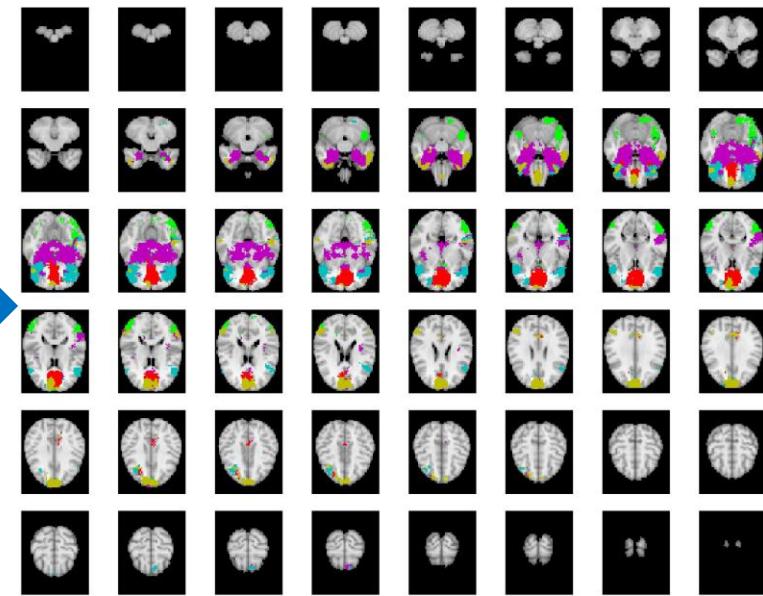
各認知機能について、そのcognitive mapを構成するvoxelsとほかの認知機能のcognitive mapsとのRSFCを測り、それをもとに認知機能を細分化して分析する。

“emotion”内のvoxelsのクラスタリング結果

emotion



clustering



脳の機能的結合に基づく認知機能概念の概念分析

目的:

各認知機能について、そのcognitive mapを構成するvoxelsとほかの認知機能のcognitive mapsとのRSFCを測り、それをもとに認知機能を細分化して分析する。

“emotion”内のvoxelsのクラスタリング結果

Cluster 1, voxels = 4402/26516

decision making 0.464
choice 0.457
thought 0.402
reward 0.389
arousal 0.377 意思決定
default mode network 0.37
impulsivity 0.333
stress 0.313
fear 0.279
familiarity 0.266

Cluster 4, voxels = 10114/26516

fear 0.221
anxiety 0.21
facial expression 0.198
emotional expression 0.187
arousal 0.177 恐れ
anticipation 0.149
habit 0.14
pain 0.133
reward 0.132
emotion regulation 0.132

Cluster 2, voxels = 2693/26516

gaze 0.337
face perception 0.333
object recognition 0.322
spatial attention 0.322
visual search 0.315 視覚
naming 0.253
mental imagery 0.211
search 0.191
selective attention 0.183
reading 0.18

Cluster 3, voxels = 4948/26516

theory of mind 0.379
narrative 0.364
belief 0.363
inference 0.36
judgment 0.343 他者や自分の心情
familiarity 0.319
autobiographical memory 0.318
default mode network 0.313
intention 0.311
concept 0.307

Cluster 5, voxels = 4359/26516

context 0.304
metaphor 0.264
decision 0.241
meaning 0.235
emotion regulation 0.221 抽象的意味の把握
sentence comprehension 0.23
language 0.228
phonological processing 0.205
cognitive control 0.204
deception 0.198

“emotion”は、意思決定、視覚、他者や自分の心情、恐れ、抽象的な意味の把握の各々に関与するサブ機能へと細分される。

脳の機能的結合に基づく認知機能概念の概念分析

目的:

各認知機能について、そのcognitive mapを構成するvoxelsとほかの認知機能のcognitive mapsとのRSFCを測り、それをもとに認知機能を細分化して分析する。

“prospective memory”内のvoxelsのクラスタリング結果

Cluster 1, voxels = 243/1186

default mode network 0.457
memory retrieval 0.443
retrieval 0.431
reasoning 0.416
episodic memory 0.37
記憶
autobiographical memory 0.365
belief 0.329
memory 0.327
thought 0.306
familiarity 0.301

Cluster 2, voxels = 375/1186

intelligence 0.342
reasoning 0.284
uncertainty 0.282
decision making 0.282
cognitive 知的判断 0.27
choice 0.265
expectancy 0.241
memory retrieval 0.232
default mode network 0.221
retrieval 0.218

Cluster 3, voxels = 179/1186

action 0.236
movement 0.216
spatial working memory 0.215
motor imagery 0.213
skill 0.167
運動
mental rotation 0.163
maintenance 0.154
goal 0.151
planning 0.138
attention 0.122

Cluster 4, voxels = 202/1186

decision making 0.381
default mode network 0.377
choice 0.372
thought 0.334
emotion 0.324
意思決定
impulsivity 0.32
intelligence 0.305
reward 0.301
arousal 0.283
belief 0.282

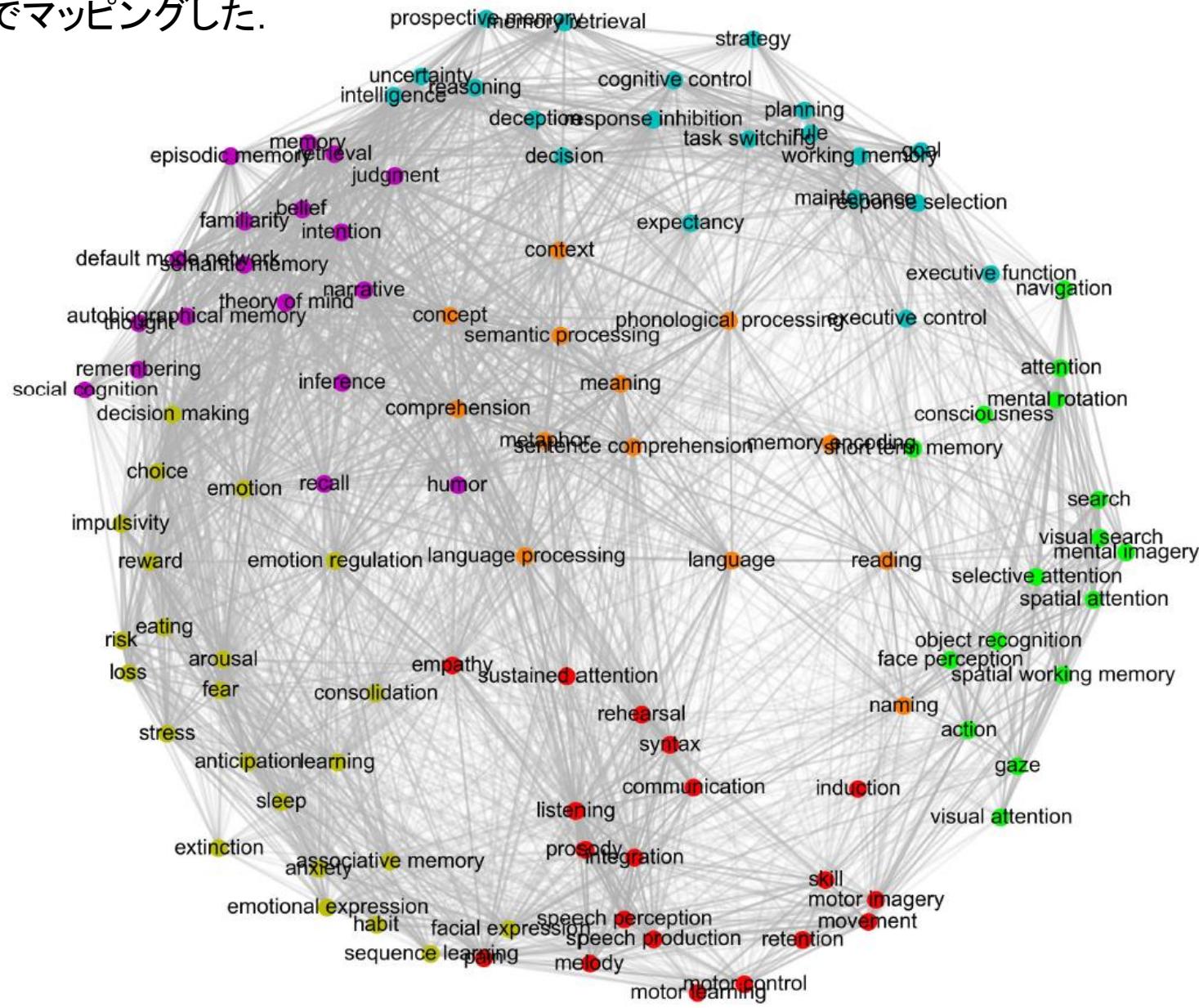
Cluster 5, voxels = 187/1186

expectancy 0.444
cognitive control 0.406
rule 0.392
response inhibition 0.368
intelligence 0.330
実行機能
working memory 0.33
response selection 0.297
planning 0.291
deception 0.26
decision 0.255

“prospective memory”は、記憶、知的判断、運動、意思決定、実行機能の各自に関与するサブ機能へと細分される。

認知機能間ネットワーク

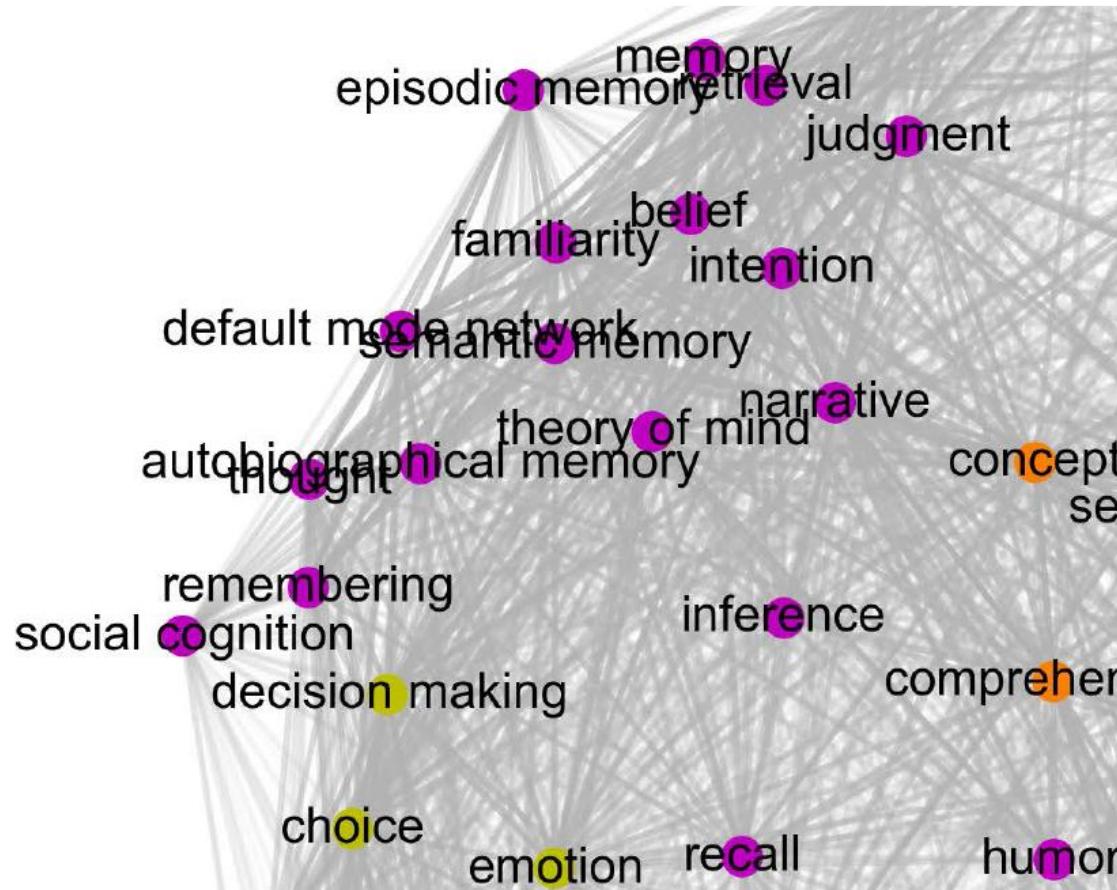
cognitive mapsの間のRSFCを測り、それをもとに認知機能をクラスタに分け、さらに多次元尺度法でマッピングした。



認知機能間ネットワーク

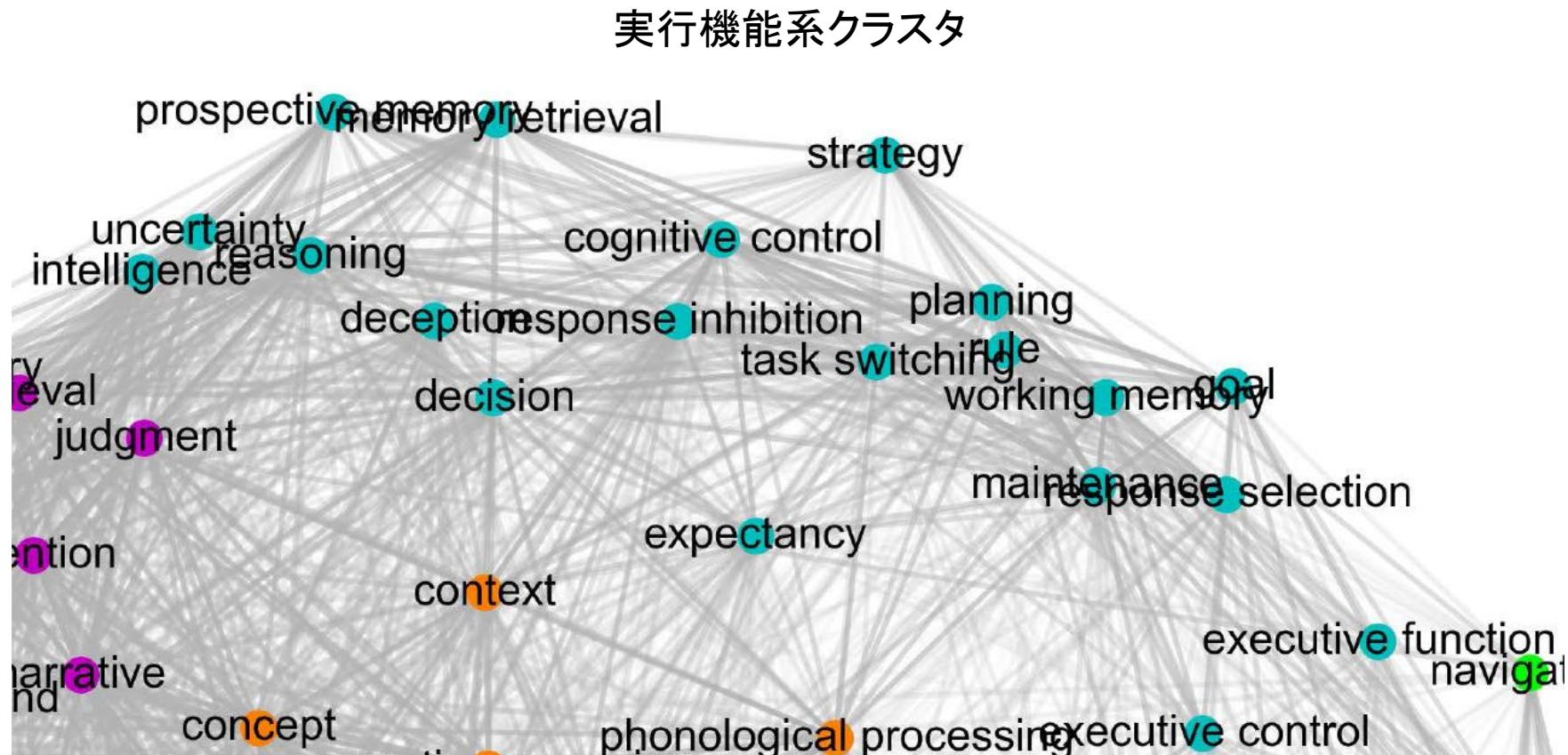
cognitive mapsの間のRSFCを測り、それをもとに認知機能をクラスタに分け、さらに多次元尺度法でマッピングした。

自己・他者関連クラスタ



認知機能間ネットワーク

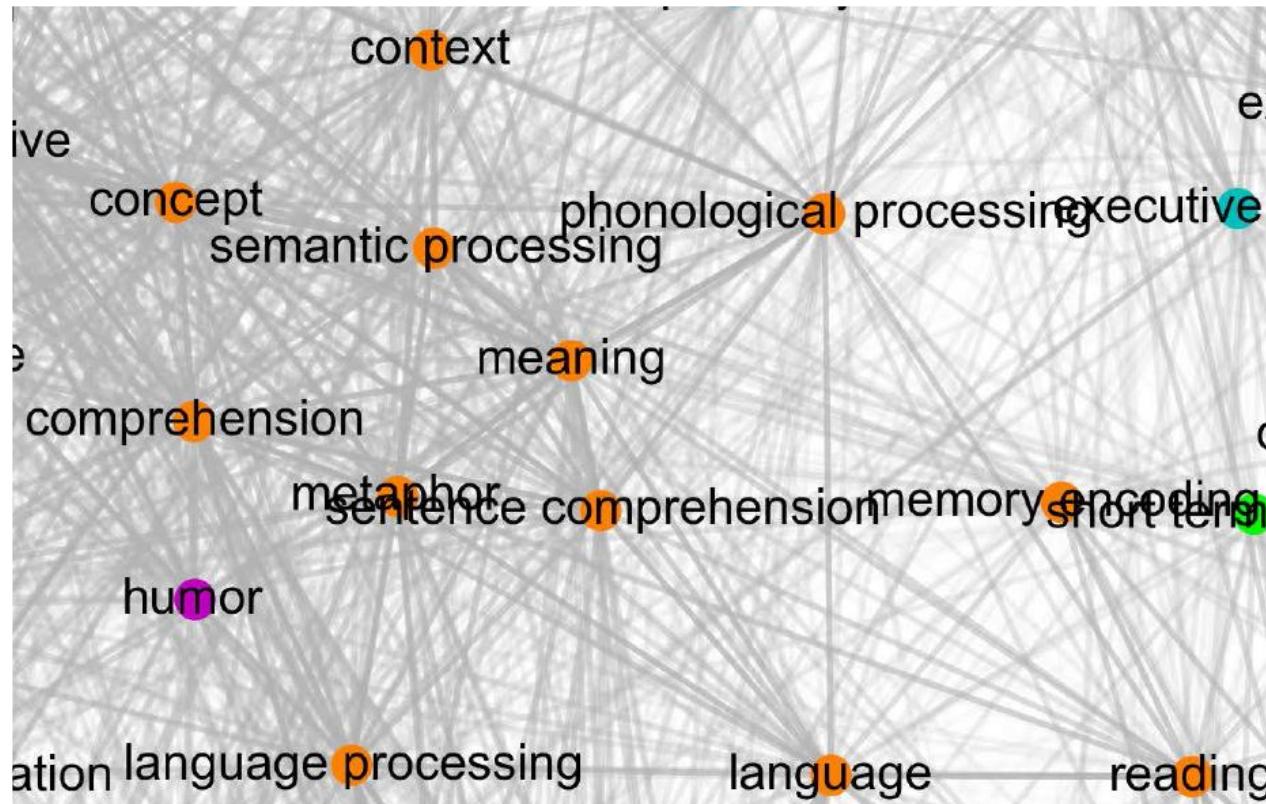
cognitive mapsの間のRSFCを測り、それをもとに認知機能をクラスタに分け、さらに多次元尺度法でマッピングした。



認知機能間ネットワーク

cognitive mapsの間のRSFCを測り、それをもとに認知機能をクラスタに分け、さらに多次元尺度法でマッピングした。

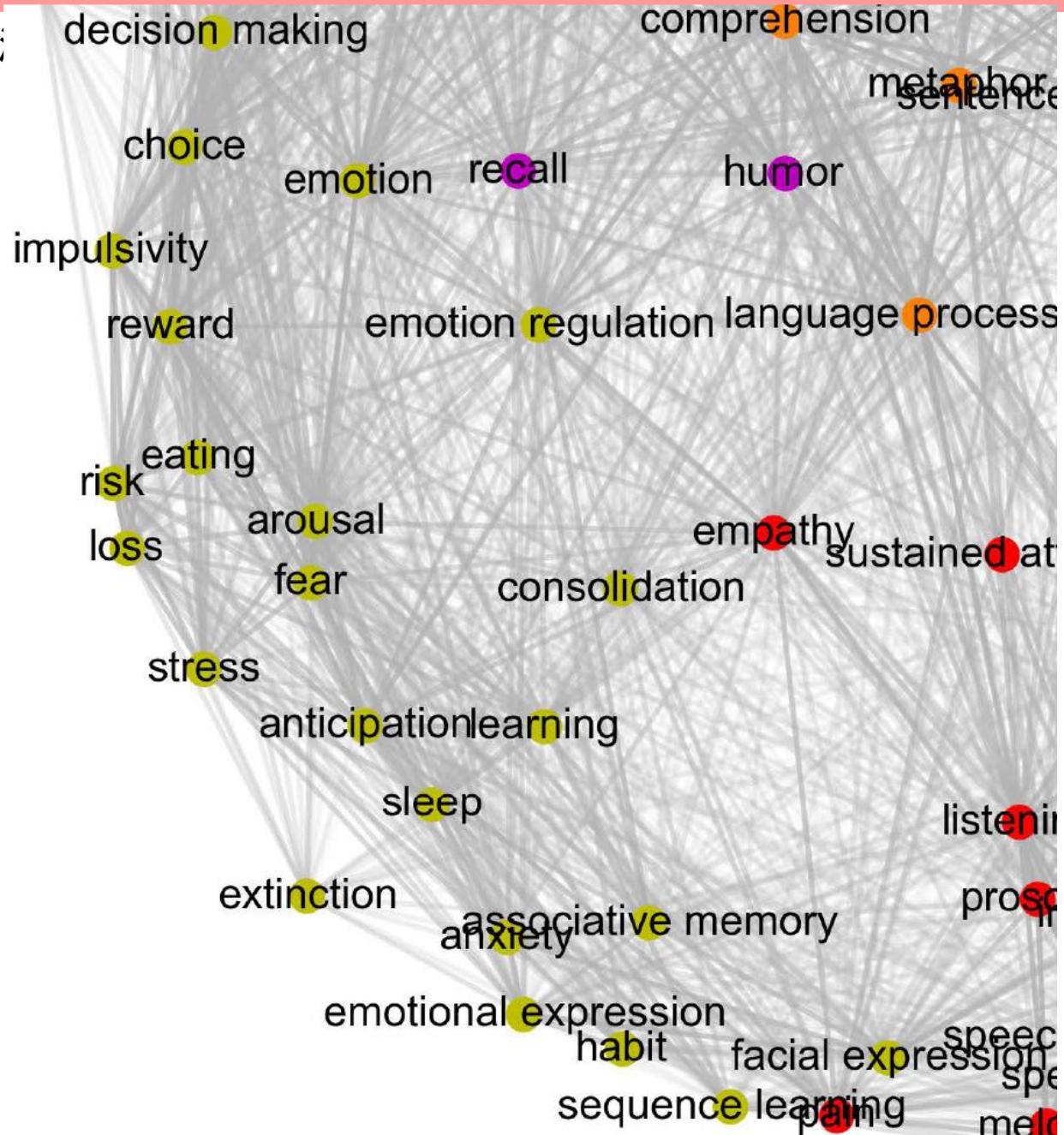
言語系クラスタ



認知機能間ネットワーク

cognitive mapsの間のRSFCを尺度法でマッピングした。

価値判断系クラスタ



認知機能間ネットワーク

cognitive mapsの間のRSFCを測り、それをもとに認知機能をクラスタに分け、さらに多次元尺度法でマッピングした。

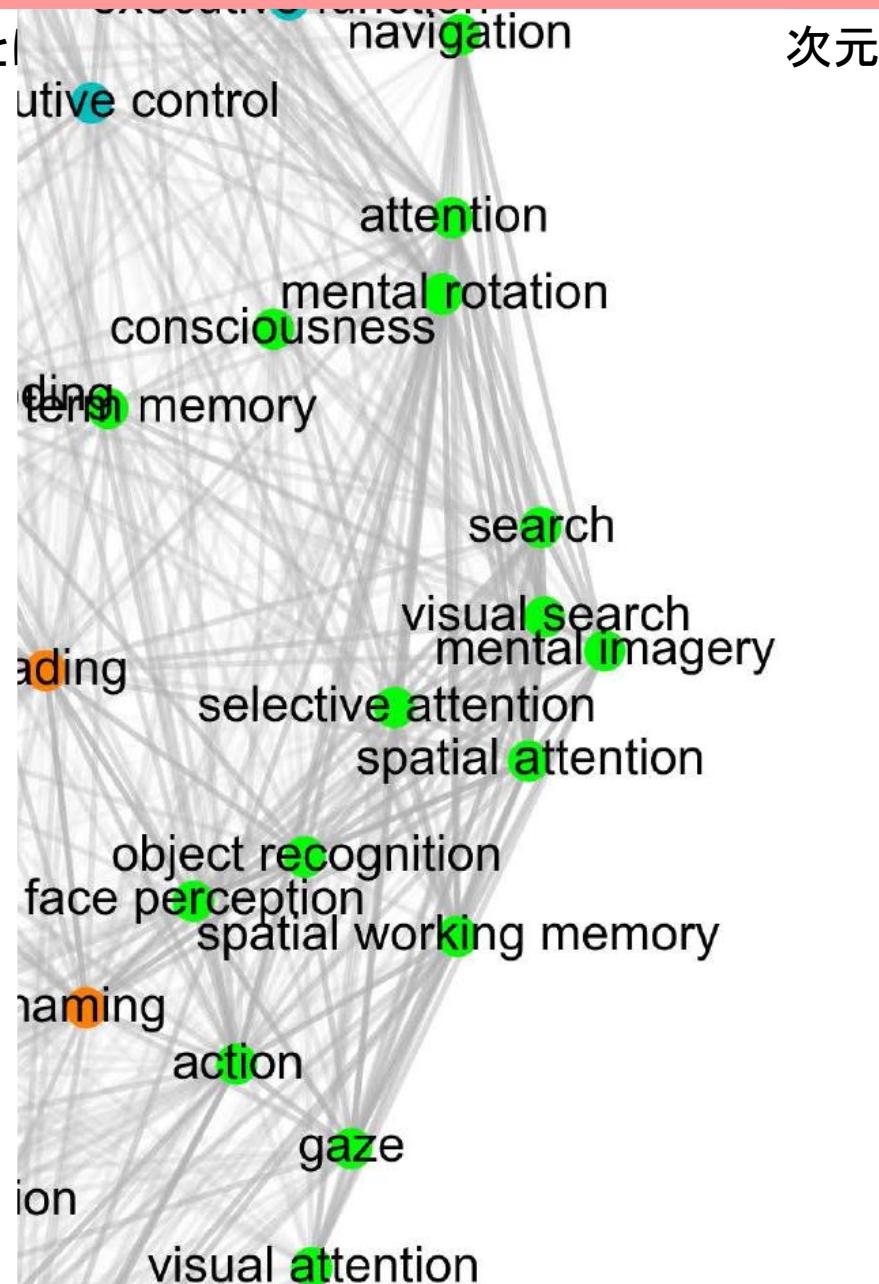
運動・表出系クラスタ



認知機能間ネットワーク

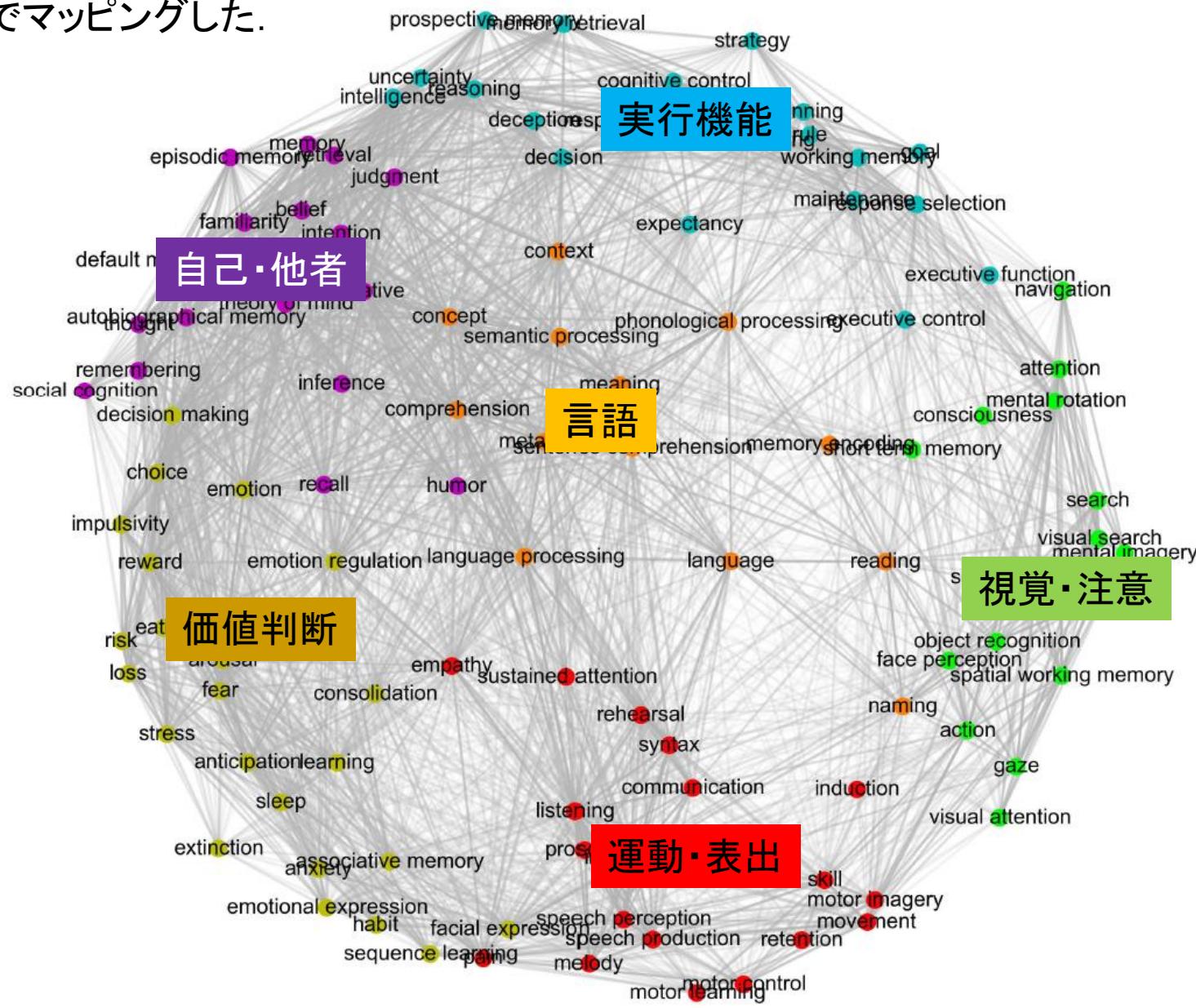
cognitive mapsの間のRSFCを測り、それをもとに尺度法でマッピングした。

視覚・注意系クラスタ



認知機能間ネットワーク

cognitive mapsの間のRSFCを測り、それをもとに認知機能をクラスタに分け、さらに多次元尺度法でマッピングした。

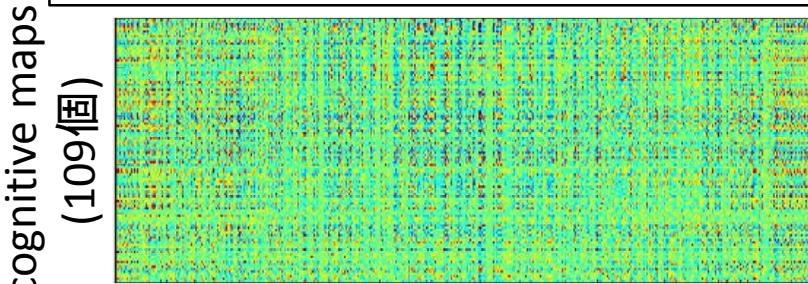


認知機能間の継承関係について

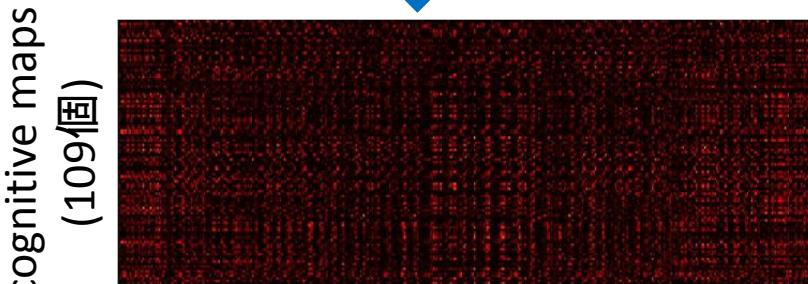
目的:

認知機能同士の継承関係を抽出する.

cognitive mapsと全脳voxelsのRSFC行列に対し, NMFを実行し, 係数行列を二値化.



↓
 ≥ 0



$$\text{voxels} \approx \text{係数行列} \times \text{基底行列}$$

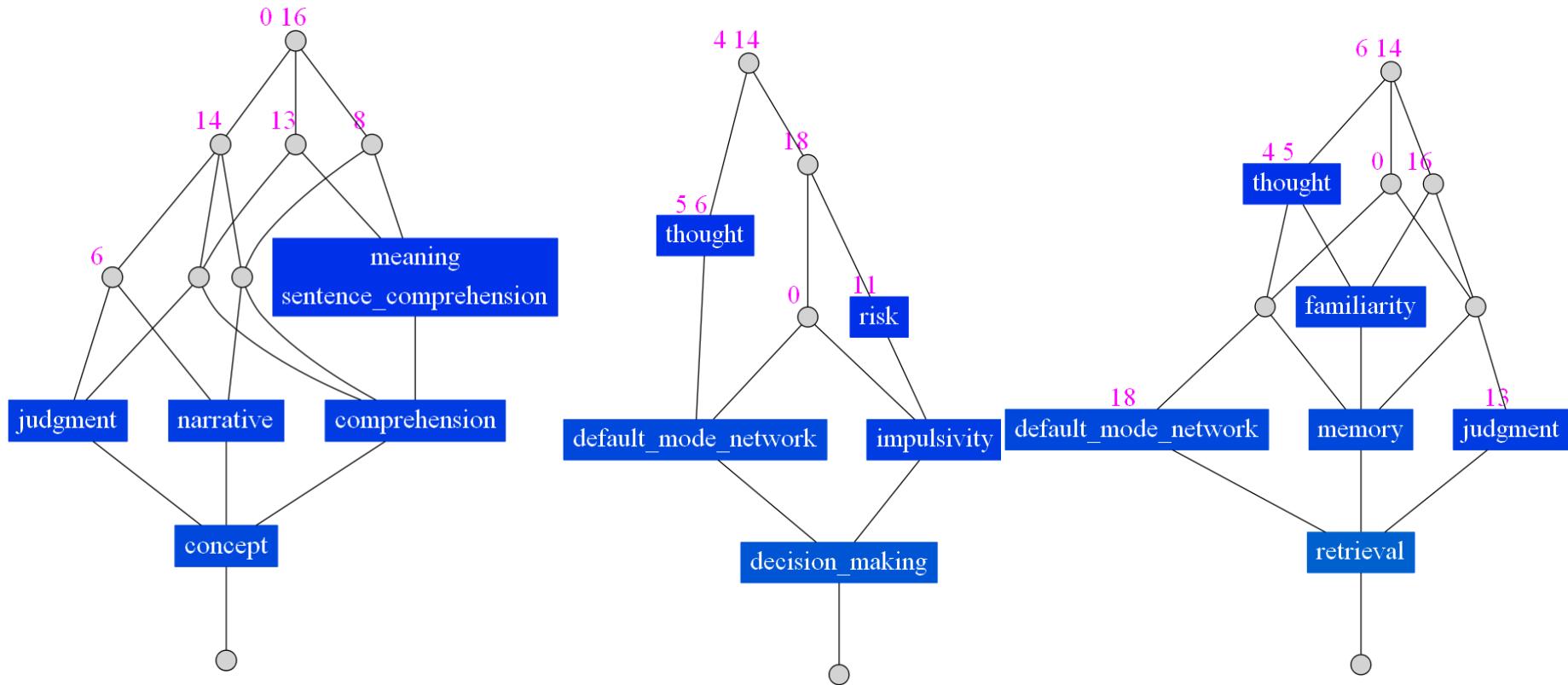


認知機能間の継承関係について

目的:

認知機能同士の継承関係を抽出する.

抽出された継承関係の一例



まとめ

- 認知機能に基づく脳の分割法を提案した
- 各parcelについて情報収集源の多様性と担う認知機能の関係を調べた.
- ネットワークの局所的クラスタ性と認知機能の関係を調べた.
- 認知情報処理における粒度を考察した.
- 脳の機能的結合に基づく認知機能概念の概念分析を行った.
- 認知機能間のRSFCネットワークを調べた.
- 認知機能間の継承関係を調べた.

今後の展望

- 創造性や好奇心、モチベーションなど、人工知能的に有用そうであるが曖昧な概念へと手法を適用する。
- 各parcelの計算論的特性(入力・出力・内部状態の関係、積分特性等)とparcelが担う認知機能の関係を明らかにする。
- 複数の因子に関与するparcelsが、汎用的な機能を持つparcelsなのか、特化した機能を持つparcelsなのかを同定する方法の開発する。
- 自然言語処理を活用し、認知機能概念の概念分析を発展させる。

Acknowledgments

- Hideaki Kawabata (Keio University)
- Yuichi Yamashita (National Center of Neurology and Psychiatry)
- Rieko Osu (The Nielsen Company Japan / ATR)
- Yohei Otaka (Keio University / Tokyo Bay Rehabilitation Hospital)
- Takashi Hanakawa (National Center of Neurology and Psychiatry)
- Manabu Honda (National Center of Neurology and Psychiatry)
- Tatsuhiro Hisatsune (The University of Tokyo)

Grant:

The Sasakawa Scientific Research Grant
A Grant-in-Aid for Young Scientists (B)