

「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

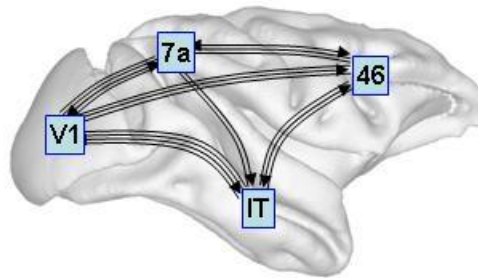
倉重 宏樹

h.kura00@gmail.com

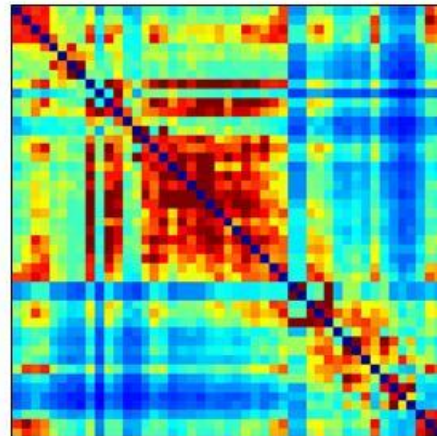
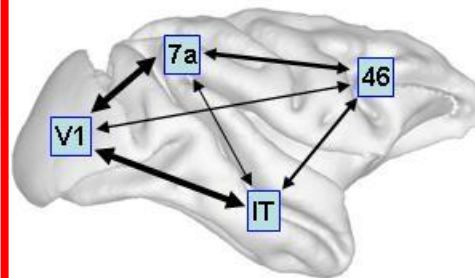
[@hir_kurashige](https://twitter.com/hir_kurashige) (Twitter)

全脳コネクティビティ

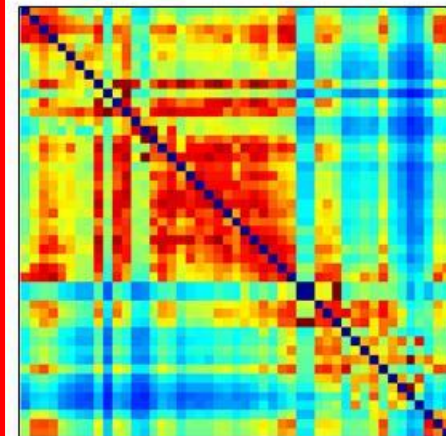
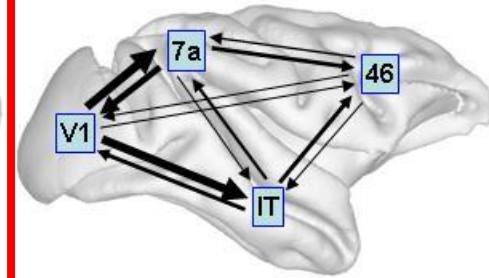
解剖学的結合
structural connectivity



機能的結合
functional connectivity



因果的結合
effective connectivity



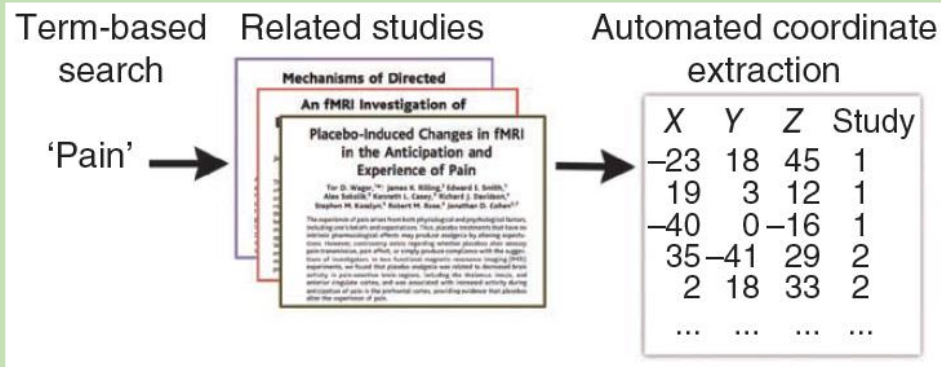
Sporns (2007) Scholapedia

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.

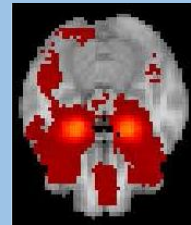


Yarkoni et. al (2011) Nat. Methods

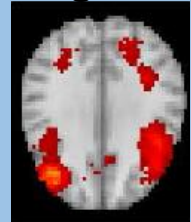
cognitive map
の再構成

今回実際に再構成した
cognitive mapの一例

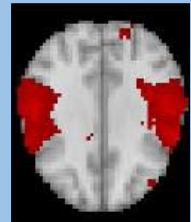
emotion



working memory

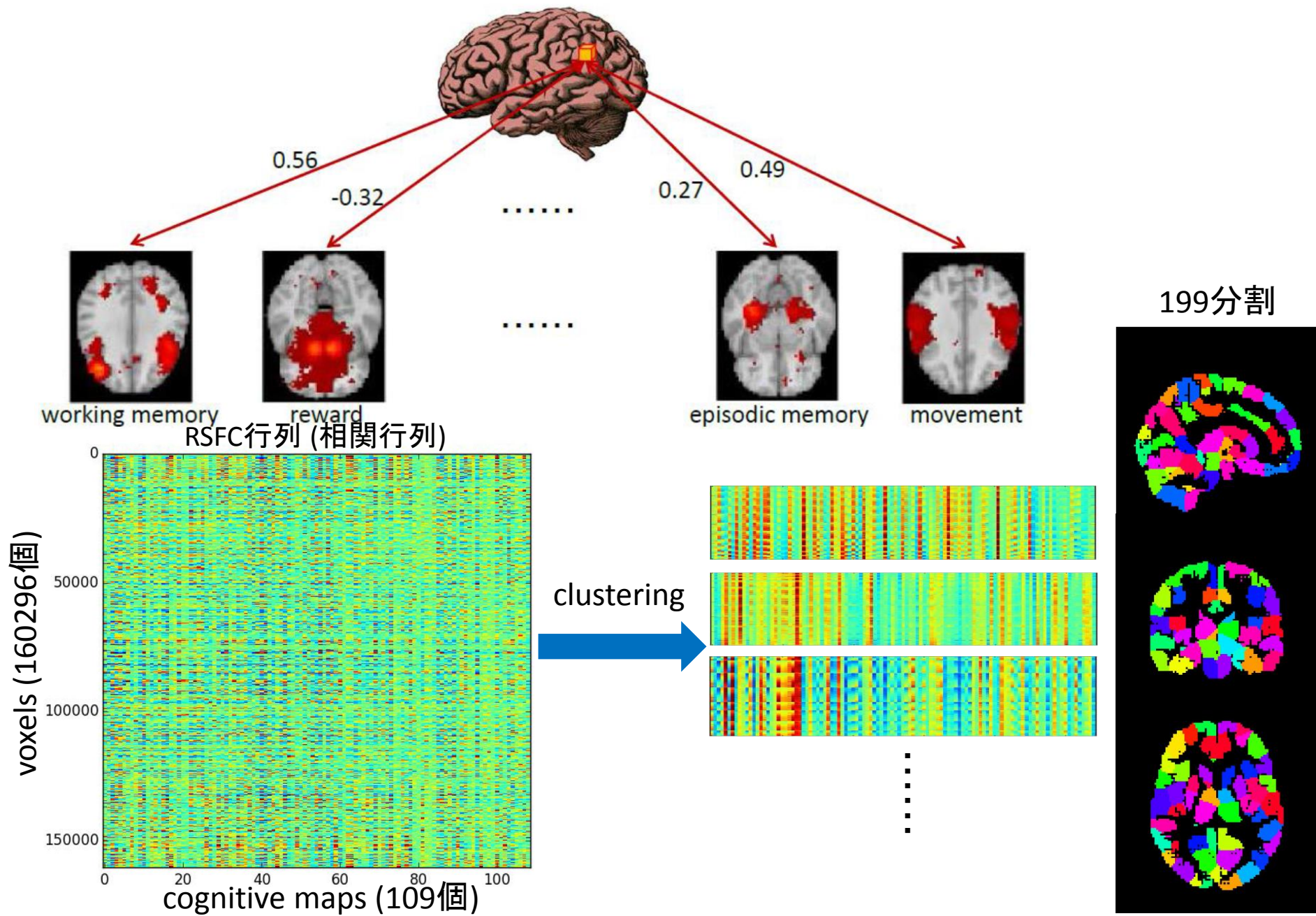


movement



⋮

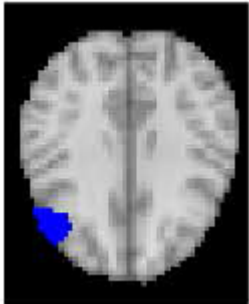
認知機能に基づく脳の分割



認知機能に基づく脳の分割

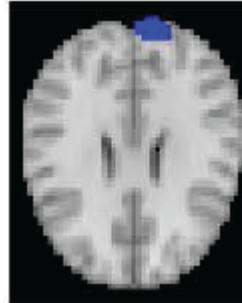
109個の認知機能との関連度をラベルに持つ199個のparcelsを得る.

parcel 4



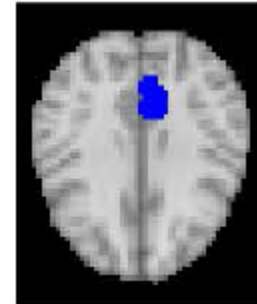
uncertainty 0.412
prospective memory 0.365
reasoning 0.351
intelligence 0.339
cognitive control 0.323
planning 0.271
deception 0.264
response inhibition 0.26
belief 0.234
rule 0.234

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

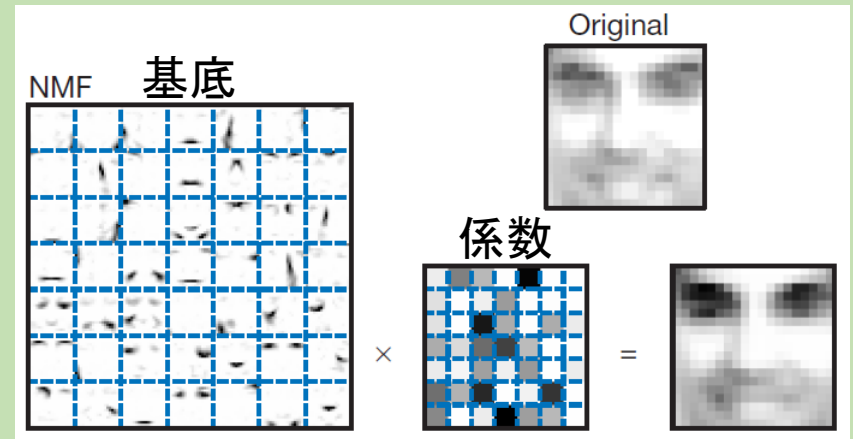


default mode network 0.466
autobiographical memory 0.447
familiarity 0.431
memory 0.407
episodic memory 0.401
retrieval 0.383
thought 0.351
belief 0.35
theory of mind 0.35
narrative 0.323

Nonnegative Matrix Factorizationによる次元削減

Nonnegative Matrix Factorization (NMF):

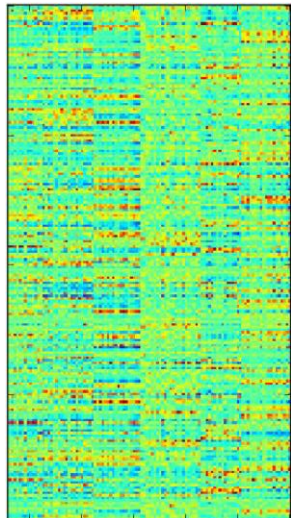
非負行列を非負基底行列と非負係数行列に分解する. 共起する成分を基底として抽出できる. 右の例だと目にあたる成分や口にあたる成分などが抽出されている.



Lee & Seung (1999) Nature

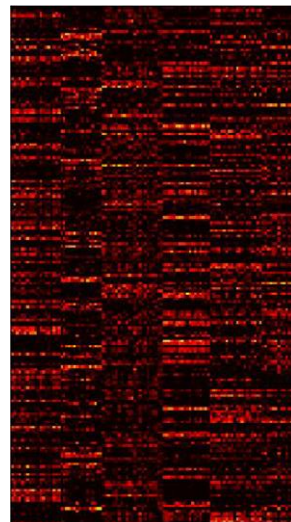
parcelsのラベル行列

parcels (199個)



cognitive maps
(109次元)

≥ 0

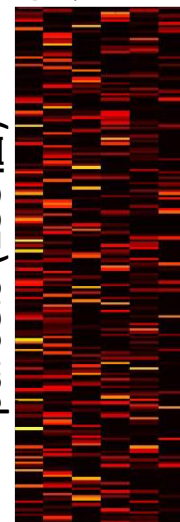


cognitive maps
(109次元)

\approx

係数行列

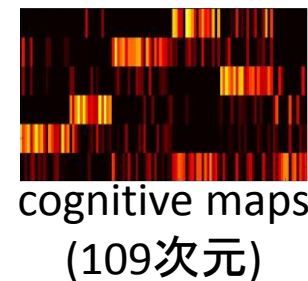
parcels (199個)



NMF因子
(6次元)

\times

基底行列



NMF因子
(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：

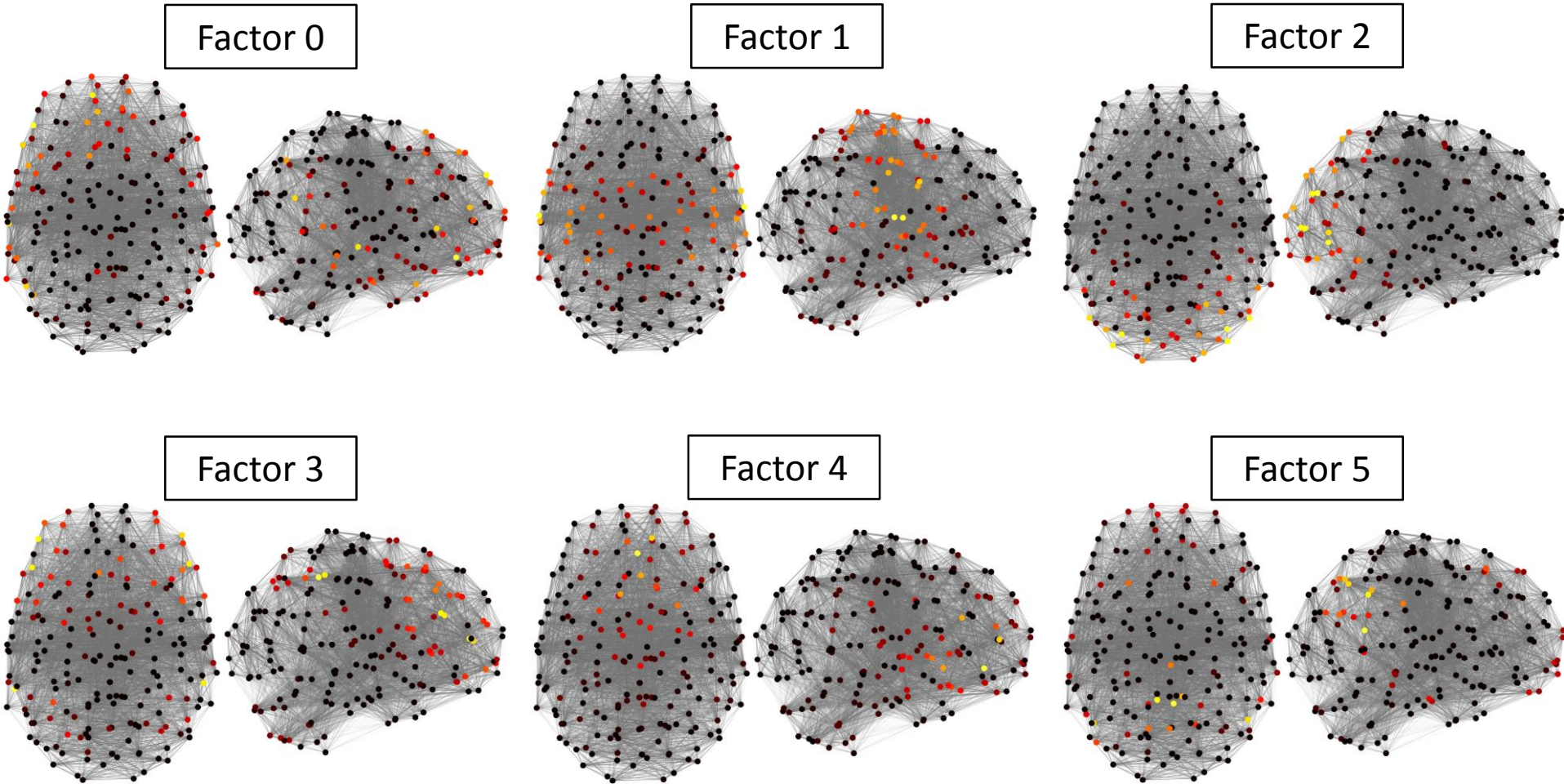
Factor 0 (概念処理)		Factor 1 (運動・表出)		Factor 2 (視覚・注意)	
comprehension	0.248	movement	0.329	mental imagery	0.342
narrative	0.245	motor imagery	0.314	spatial attention	0.333
concept	0.244	speech production	0.302	visual search	0.329
judgment	0.227	skill	0.283	search	0.317
metaphor	0.221	speech perception	0.256	object recognition	0.252
theory of mind	0.211	motor control	0.245	attention	0.242
inference	0.204	melody	0.235	gaze	0.241
belief	0.204	integration	0.226	face perception	0.223
intention	0.202	prosody	0.213	selective attention	0.218
semantic processing	0.191	listening	0.207	navigation	0.204

Factor 3 (実行機能)		Factor 4 (価値判断)		Factor 5 (記憶)	
cognitive control	0.303	reward	0.320	episodic memory	0.342
rule	0.291	anticipation	0.270	default mode network	0.302
working memory	0.289	fear	0.263	memory	0.293
planning	0.288	arousal	0.261	autobiographical memory	0.278
maintenance	0.276	choice	0.255	memory retrieval	0.266
response inhibition	0.241	decision making	0.233	remembering	0.264
expectancy	0.224	loss	0.229	retrieval	0.264
task switching	0.216	risk	0.225	thought	0.262
decision	0.210	stress	0.224	familiarity	0.254
deception	0.198	eating	0.202	prospective memory	0.195

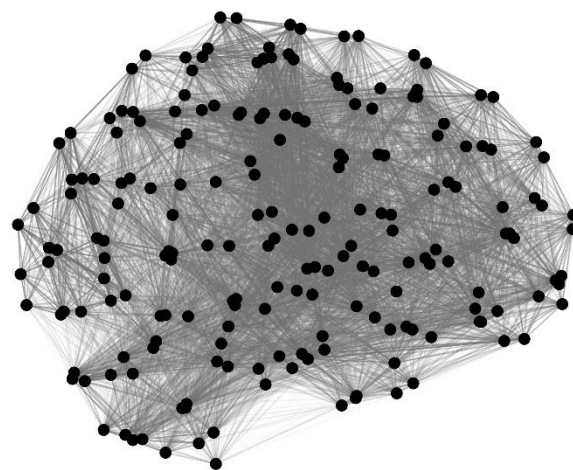
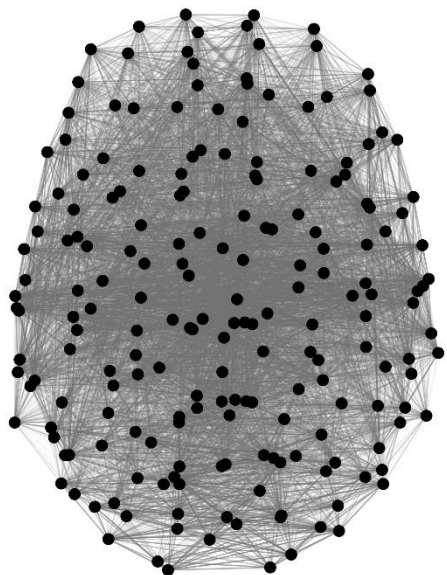
Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

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)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

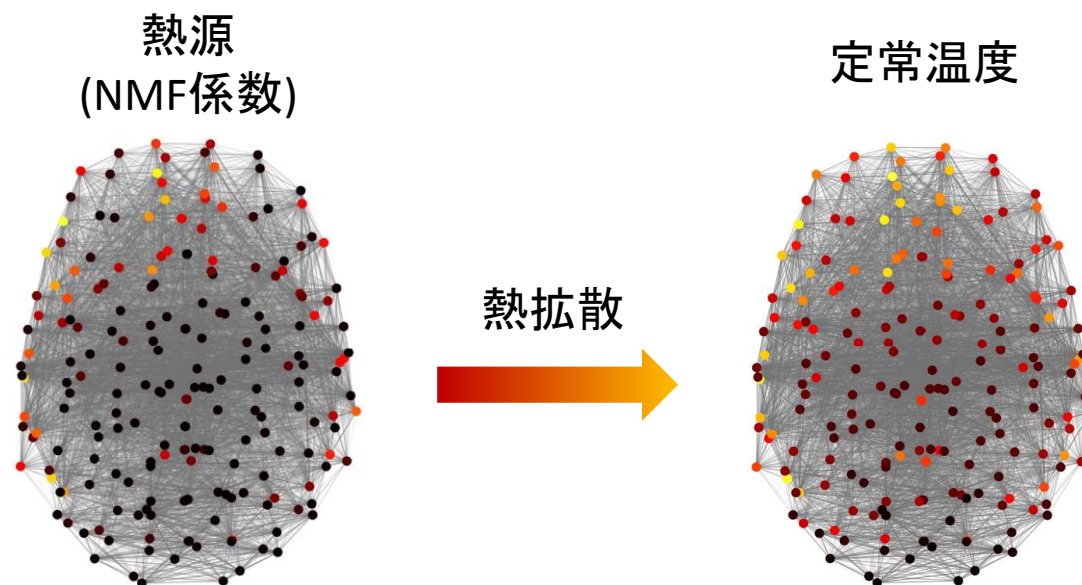


Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

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。



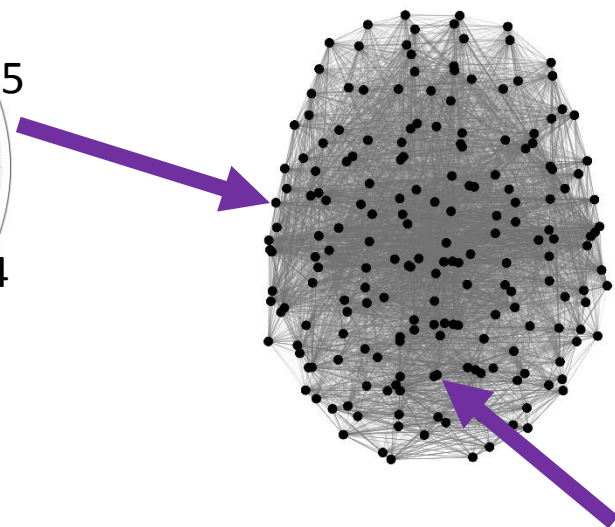
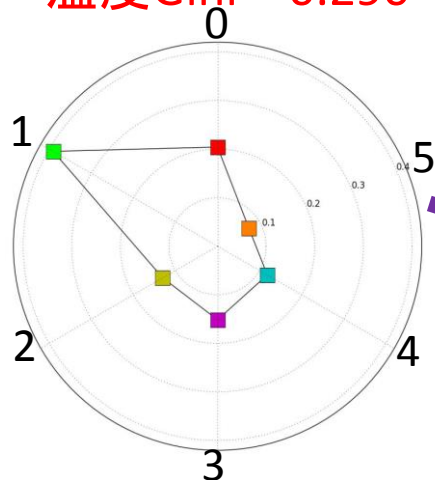
Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

情報収集源の多様性

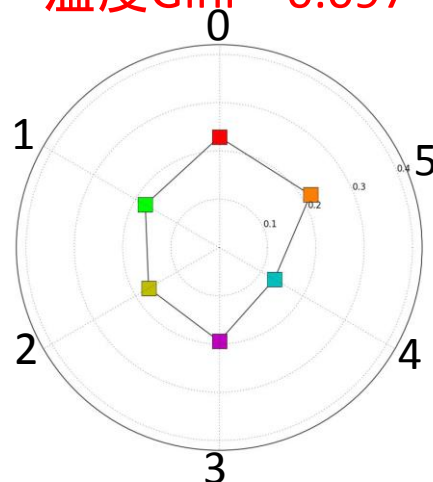
目的:
各parcelがどれくらい多様な情報源から情報を収集しているか、さらに情報収集源の多様性とparcelが担う認知機能に関係があるかを調べる。

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

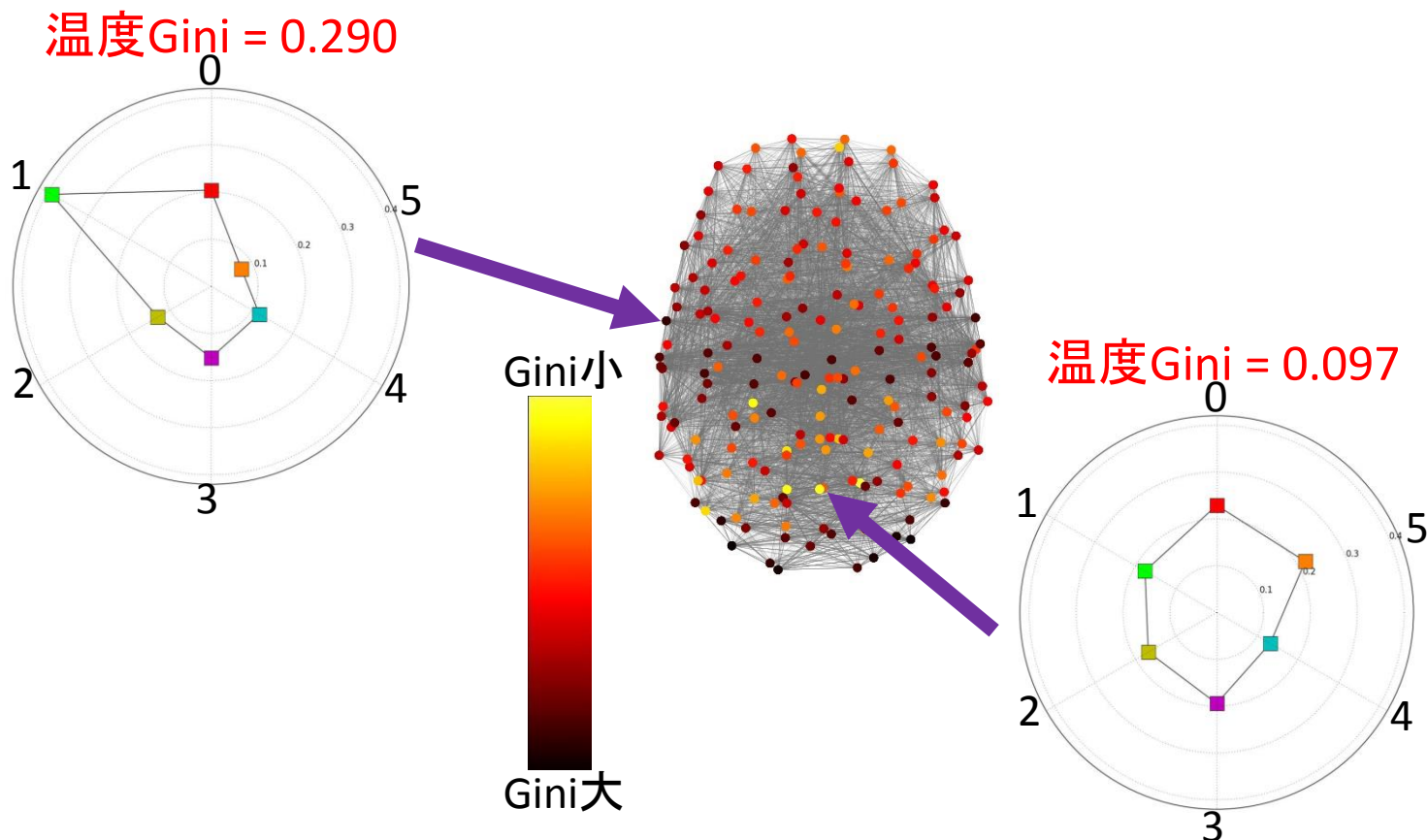


Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

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.



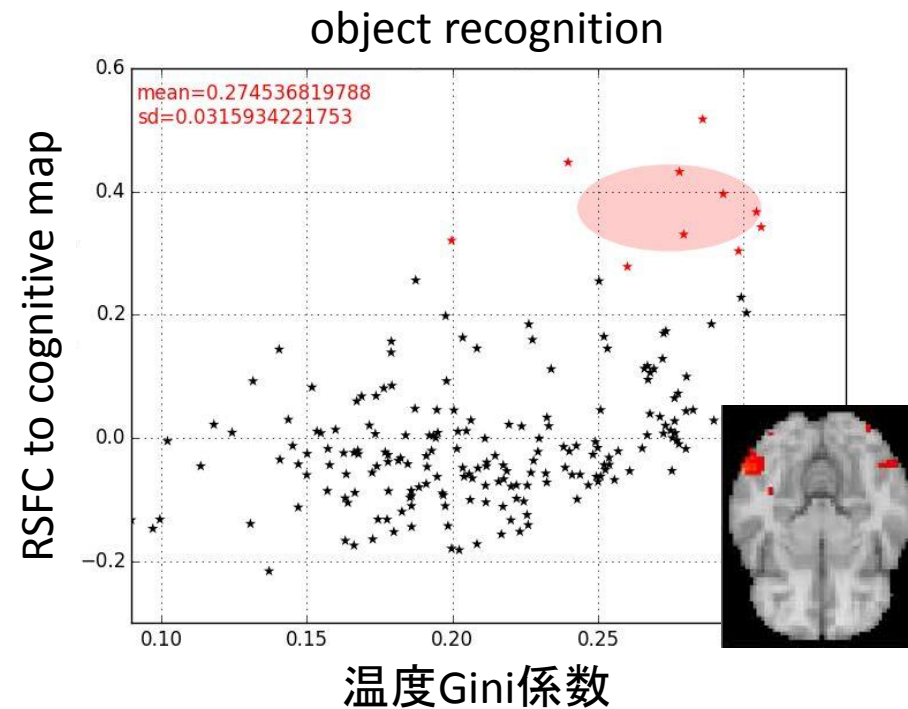
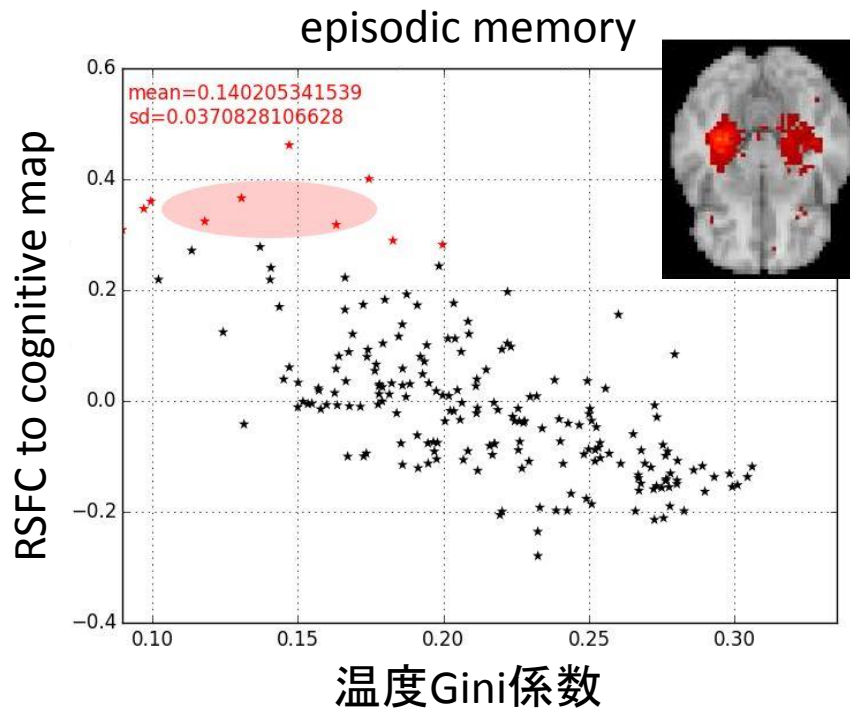
Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

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.

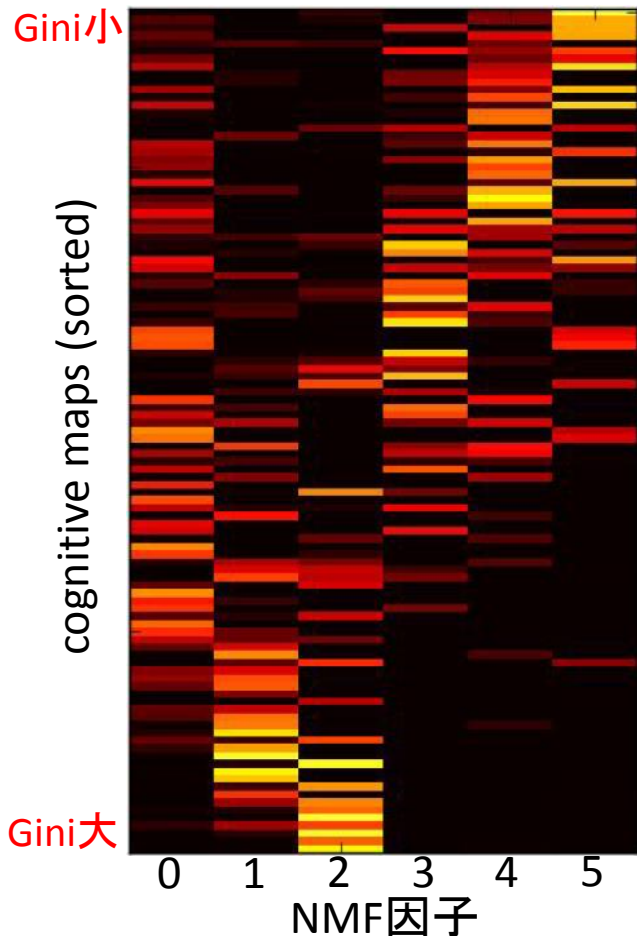


Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

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)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

ネットワークのクラスタ性と認知機能の関係

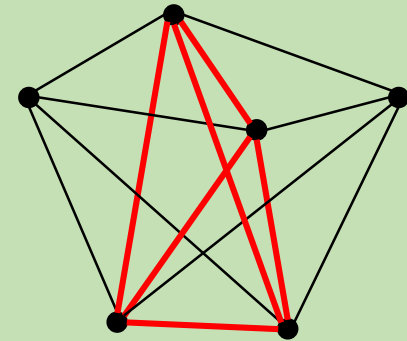
目的:

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)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

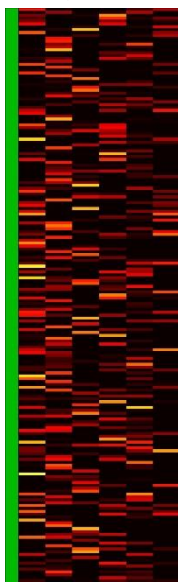
ネットワークのクラスタ性と認知機能の関係

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.

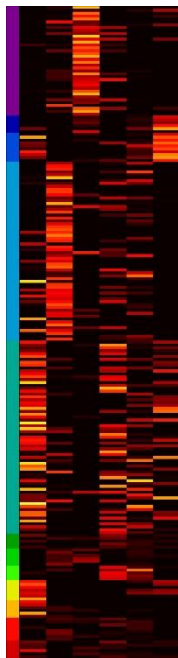
k = 3

係数行列



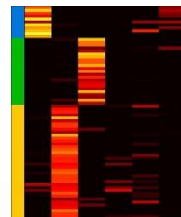
k = 5

係数行列



k = 8

係数行列



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

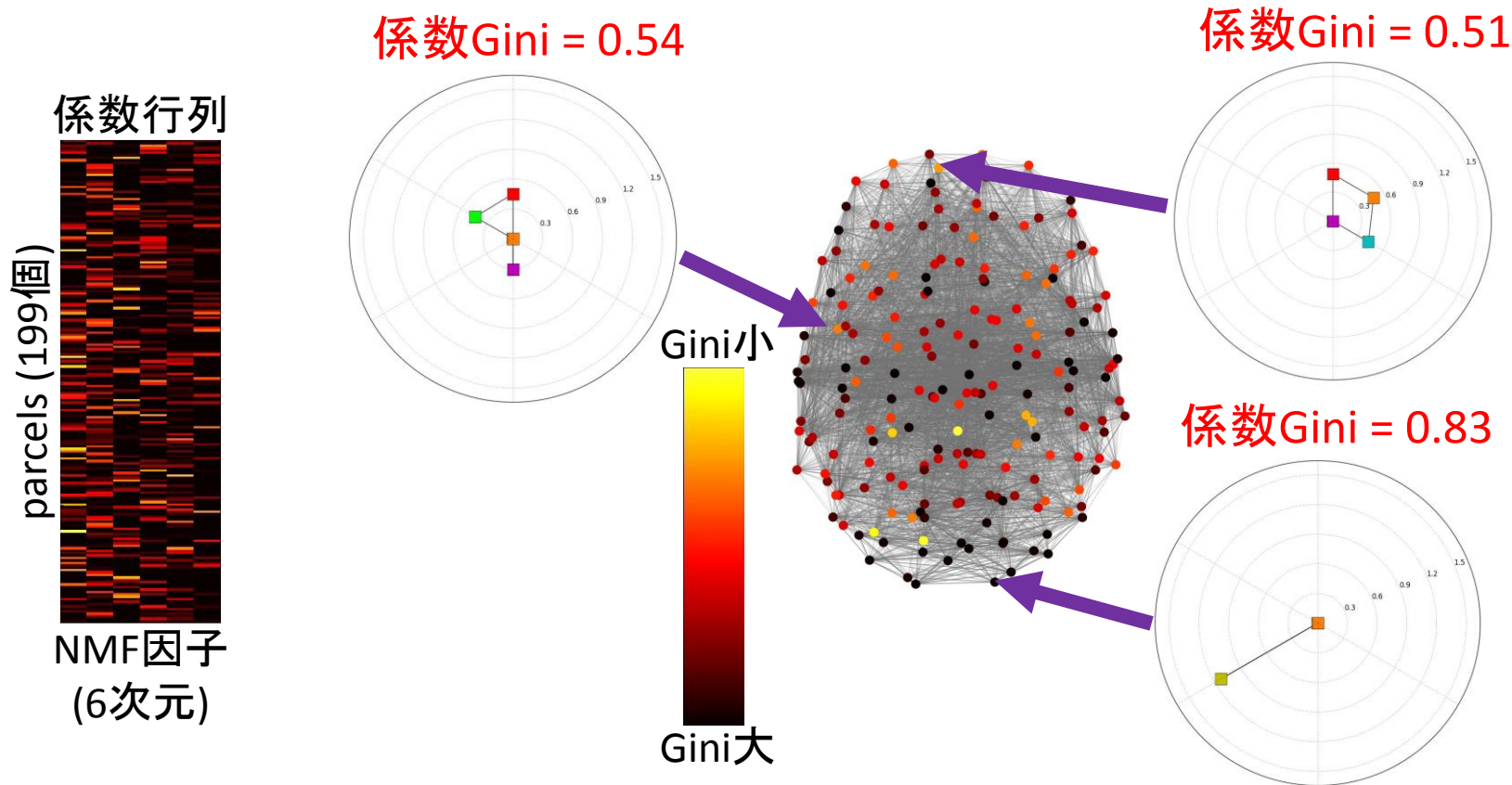
Factor 0 (概念処理)	Factor 1 (運動・表出)	Factor 2 (視覚・注意)	Factor 3 (実行機能)	Factor 4 (価値判断)	Factor 5 (記憶)
--------------------	---------------------	---------------------	--------------------	--------------------	------------------

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(様々な機能に参与する).
これと同様に, 多数の因子に参与する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:

多数の因子に参与する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(様々な機能に参与する).
これと同様に, 多数の因子に参与する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:

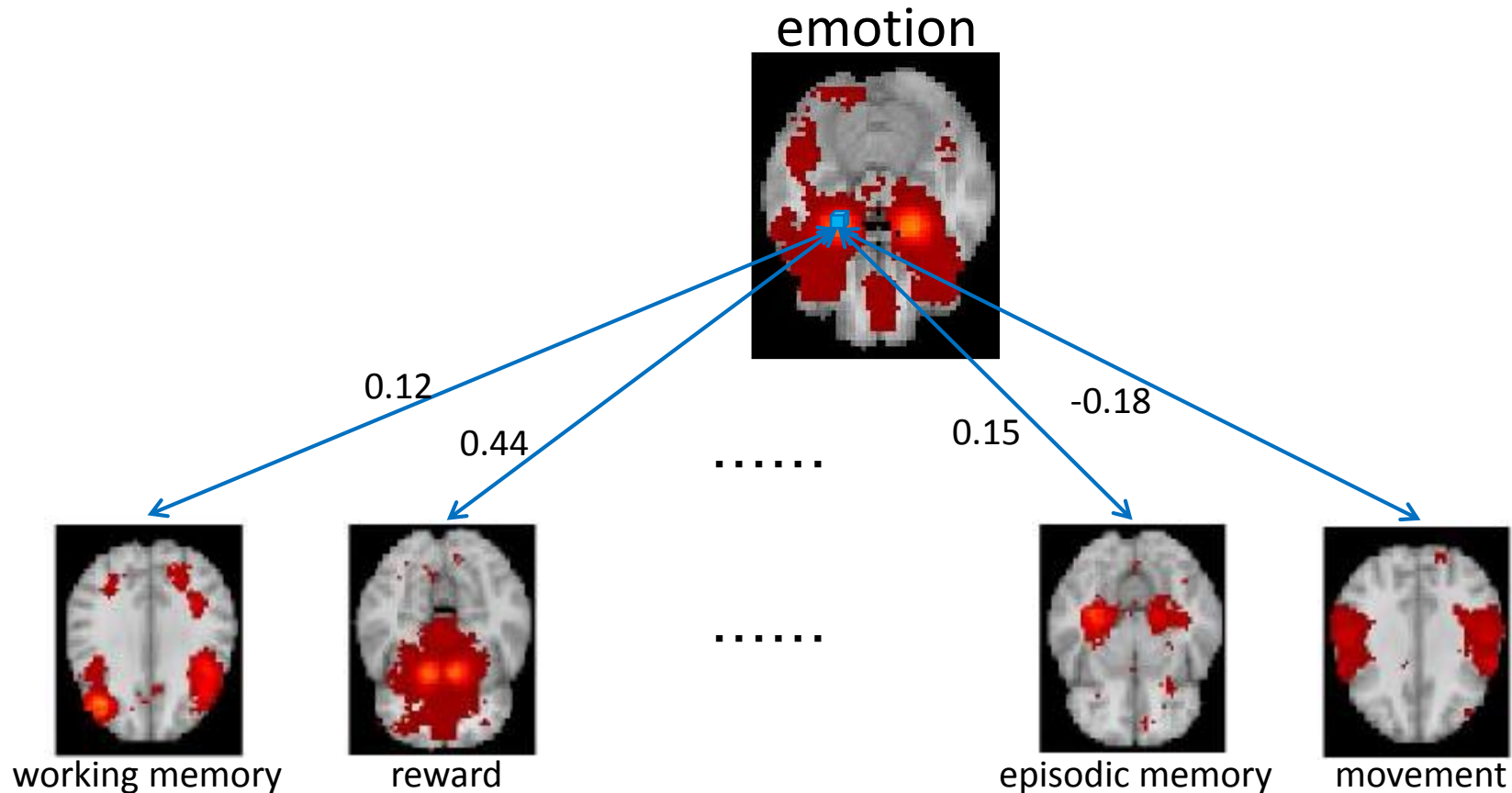
多数の因子に参与するparcelは, 多数の要因が組み合わさった特別な状況での情報処理を担う. つまり粒度の大きい機能を有する.

?

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

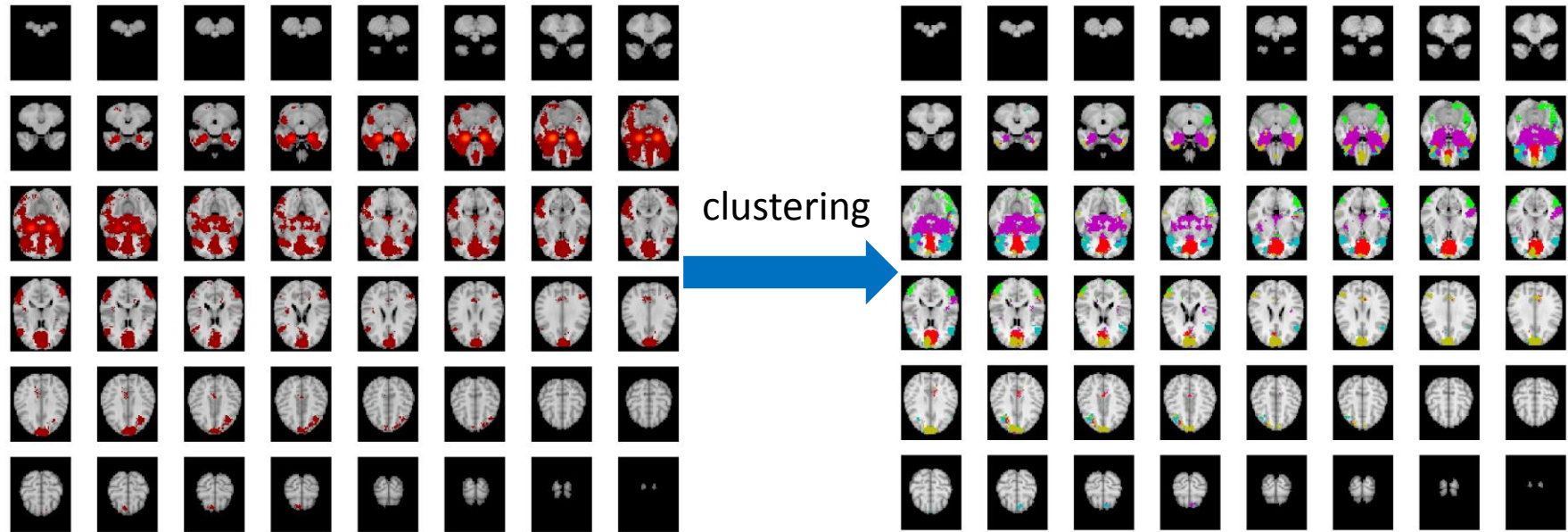
目的:
各認知機能について、そのcognitive mapを構成するvoxelsとほかの認知機能のcognitive mapsとのRSFCを測り、それをもとに認知機能を細分化して分析する。



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



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 0.37
default mode network 0.37
impulsivity 0.333
stress 0.313
fear 0.279
familiarity 0.266

意思決定

Cluster 2, voxels = 2693/26516

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

視覚

Cluster 3, voxels = 4948/26516

theory of mind 0.379
narrative 0.364
belief 0.363
inference 0.36
judgment 0.353
familiarity 0.319
autobiographical memory 0.318
default mode network 0.313
intention 0.311
concept 0.307

他者や自分の心情

Cluster 4, voxels = 10114/26516

fear 0.221
anxiety 0.21
facial expression 0.198
emotional expression 0.187
arousal 0.176
anticipation 0.149
habit 0.14
pain 0.133
reward 0.132
emotion regulation 0.132

恐れ

Cluster 5, voxels = 4359/26516

context 0.304
metaphor 0.264
decision 0.241
meaning 0.235
emotion regulation 0.235
sentence comprehension 0.23
language 0.228
phonological processing 0.205
cognitive control 0.204
deception 0.198

抽象的意味の把握

“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 Cluster 2, voxels = 375/1186 Cluster 3, voxels = 179/1186

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

記憶

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

知的判断

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

運動

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

意思決定

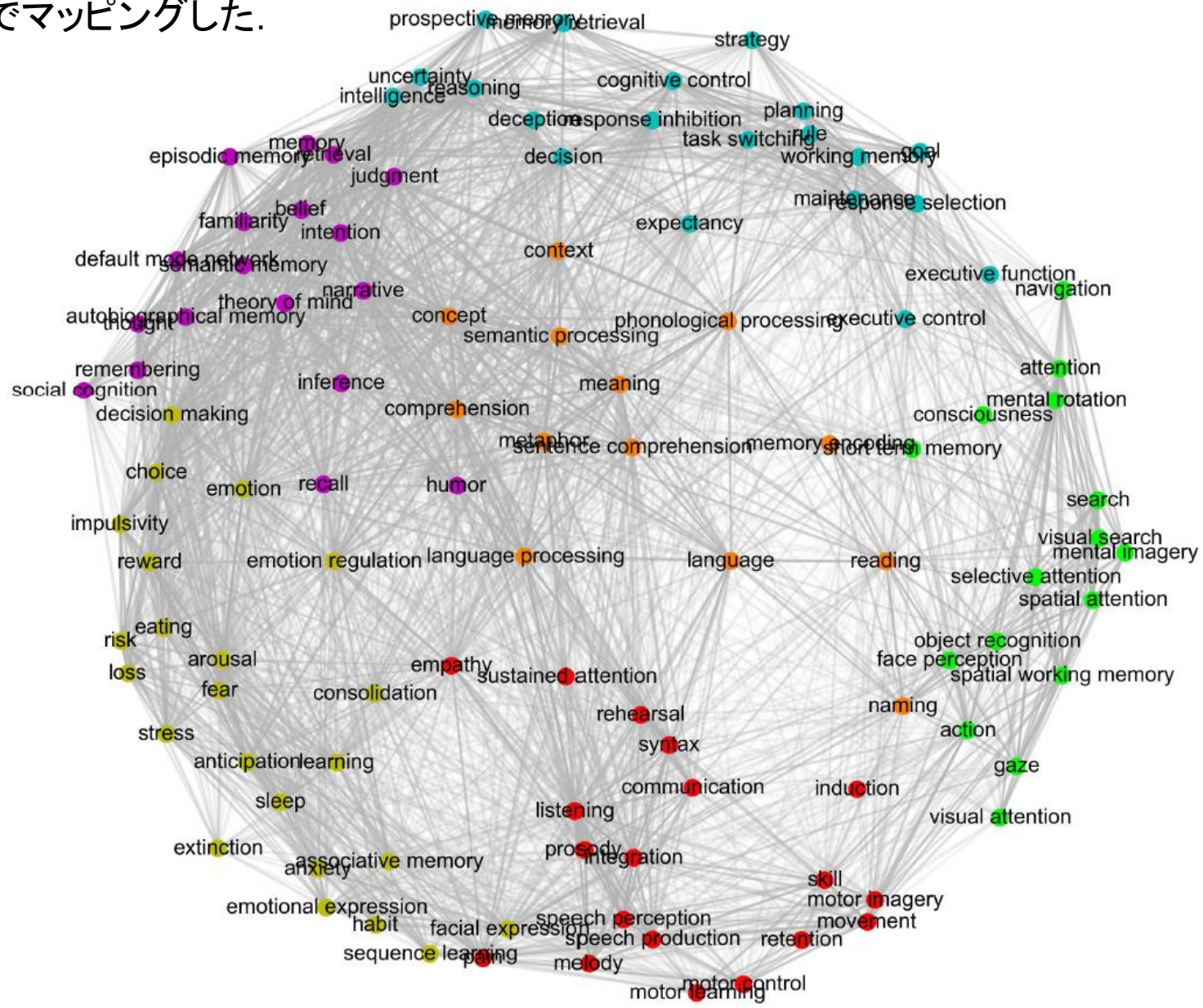
expectancy 0.444
cognitive control 0.406
rule 0.392
response inhibition 0.368
intelligence 0.339
working memory 0.33
response selection 0.297
planning 0.291
deception 0.26
decision 0.255

実行機能

“prospective memory”は, 記憶, 知的判断, 運動, 意思決定, 実行機能の各々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

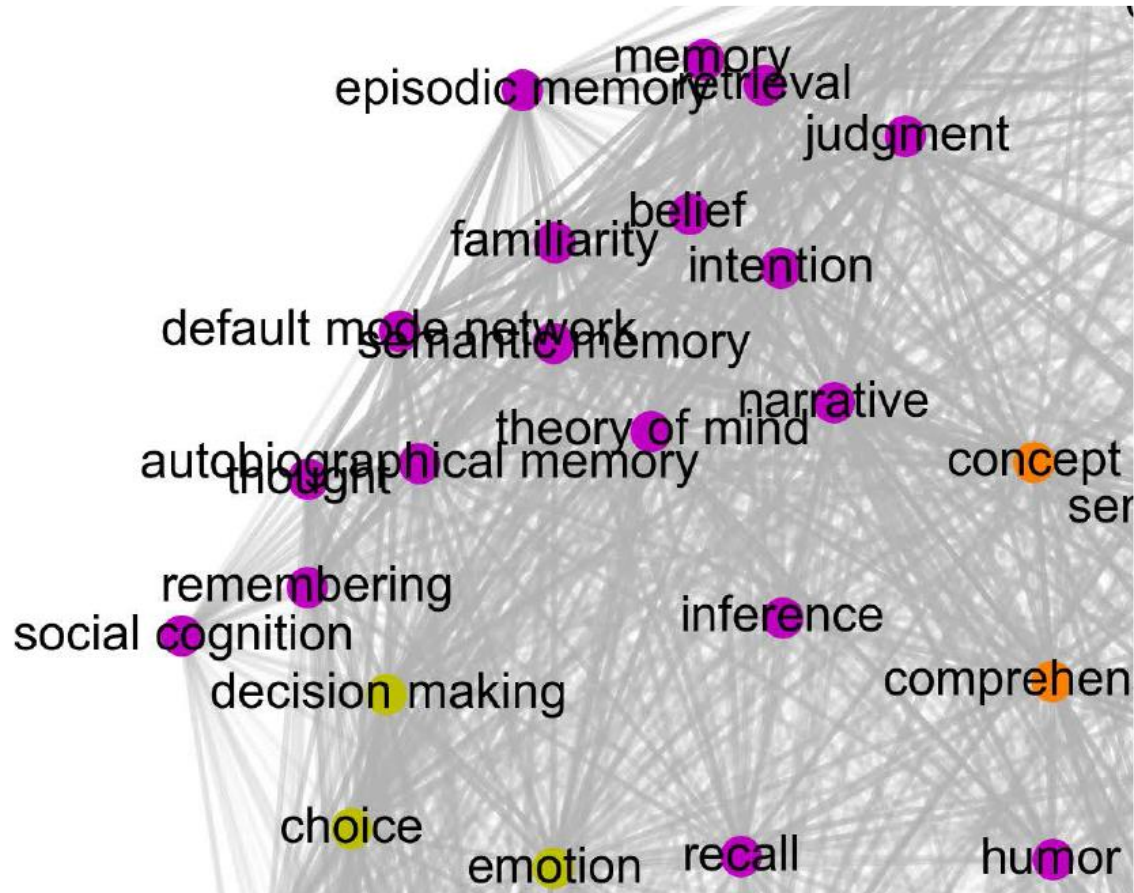
cognitive mapsの間のRSFCを測り, それをもとに認知機能をクラスタに分け, さらに多次元尺度法でマッピングした.



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。

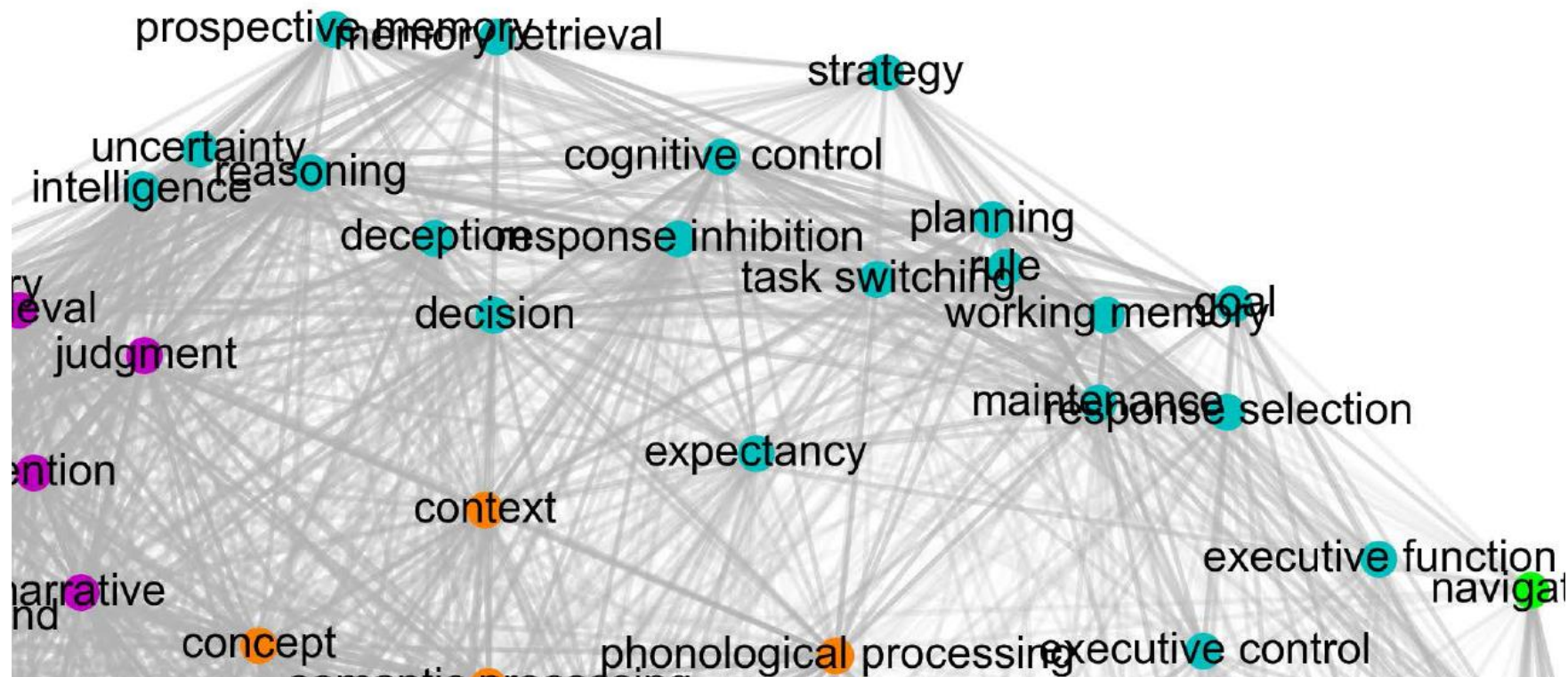
自己・他者関連クラスタ



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。

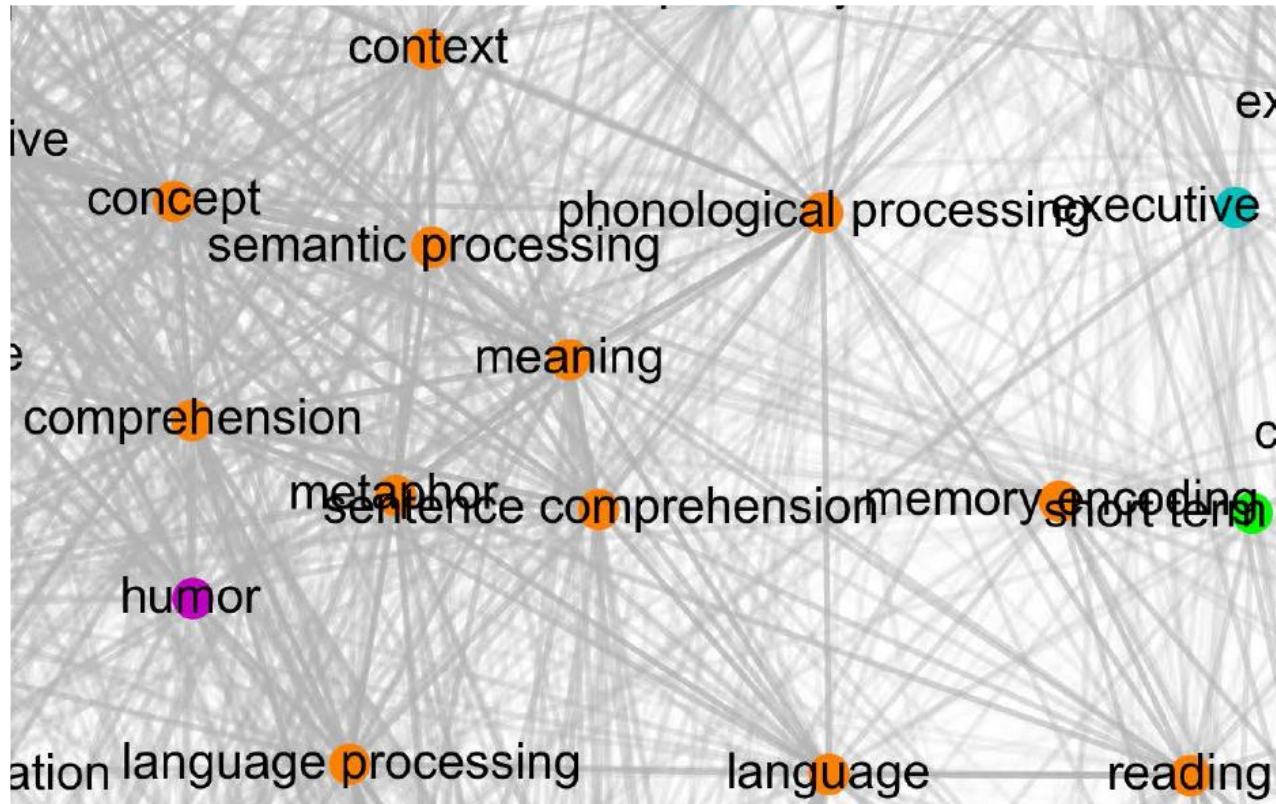
実行機能系クラスタ



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.

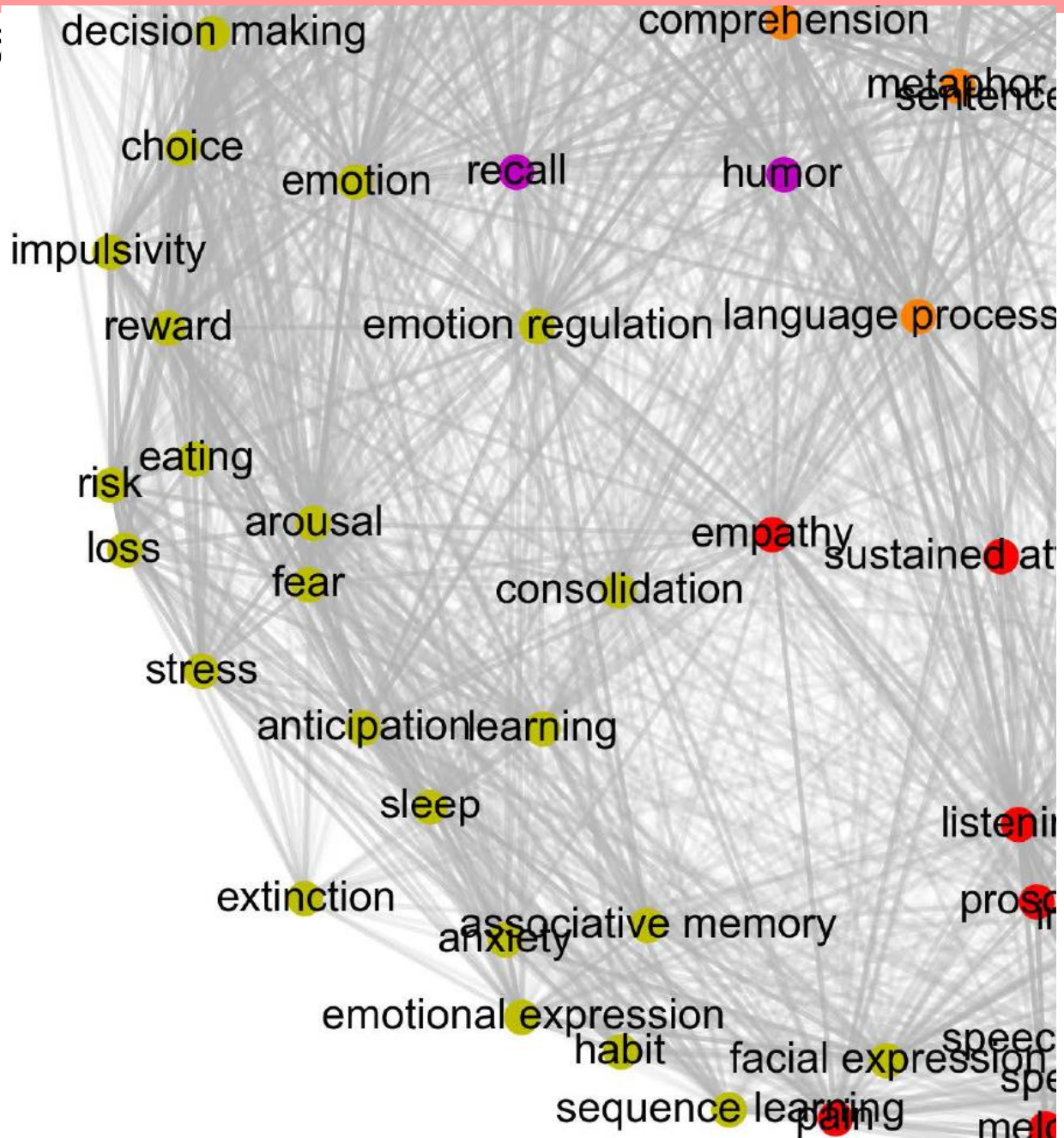
言語系クラスタ



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.

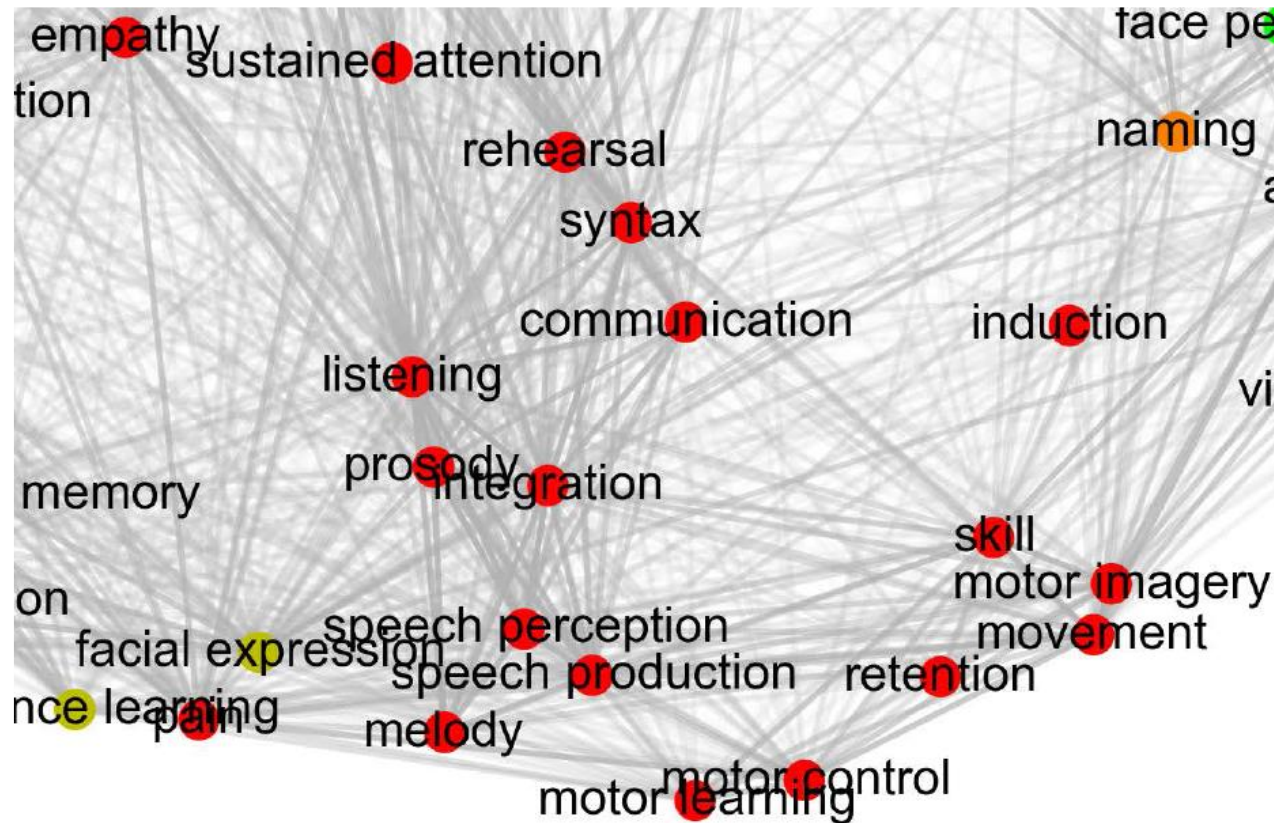
価値判断系クラスター



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。

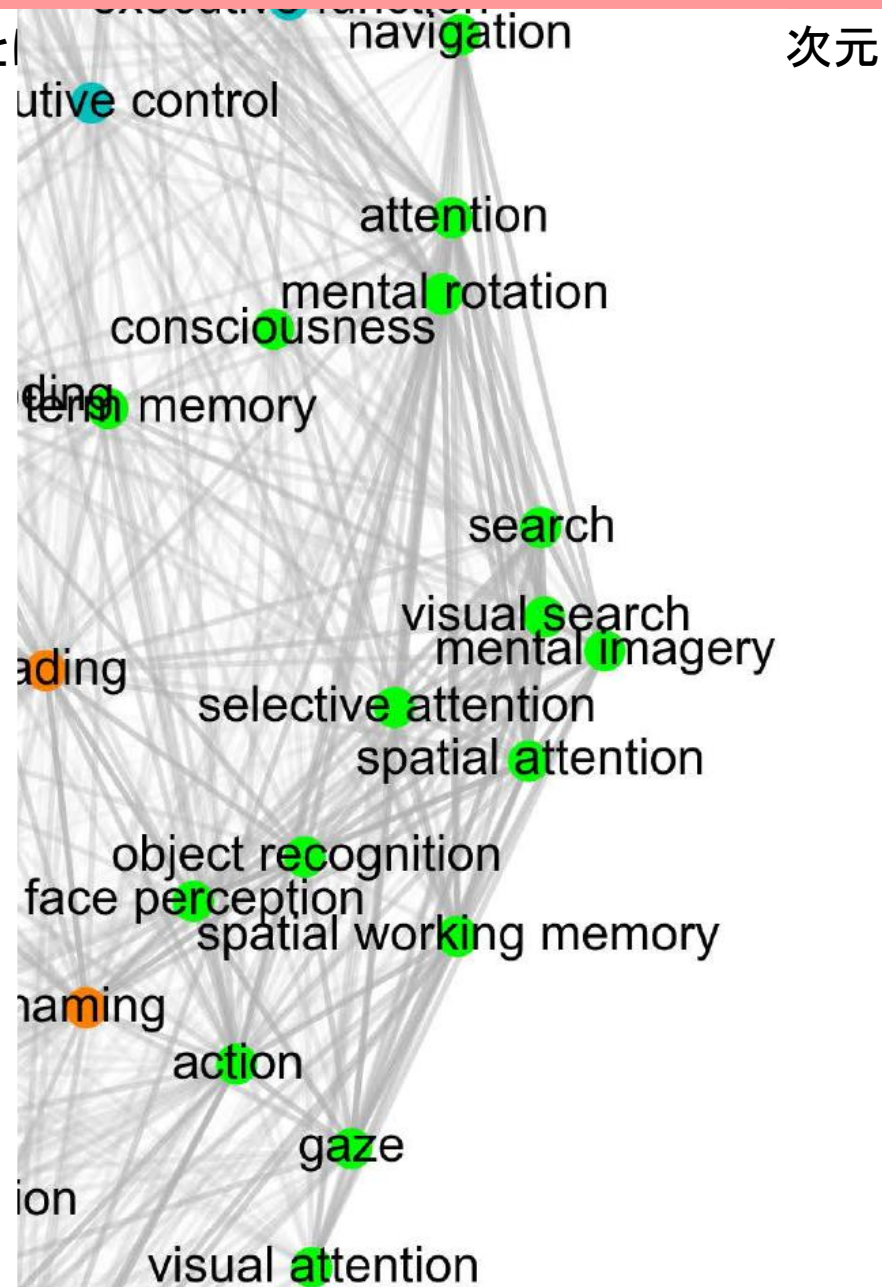
運動・表出系クラスタ



認知機能間ネットワーク

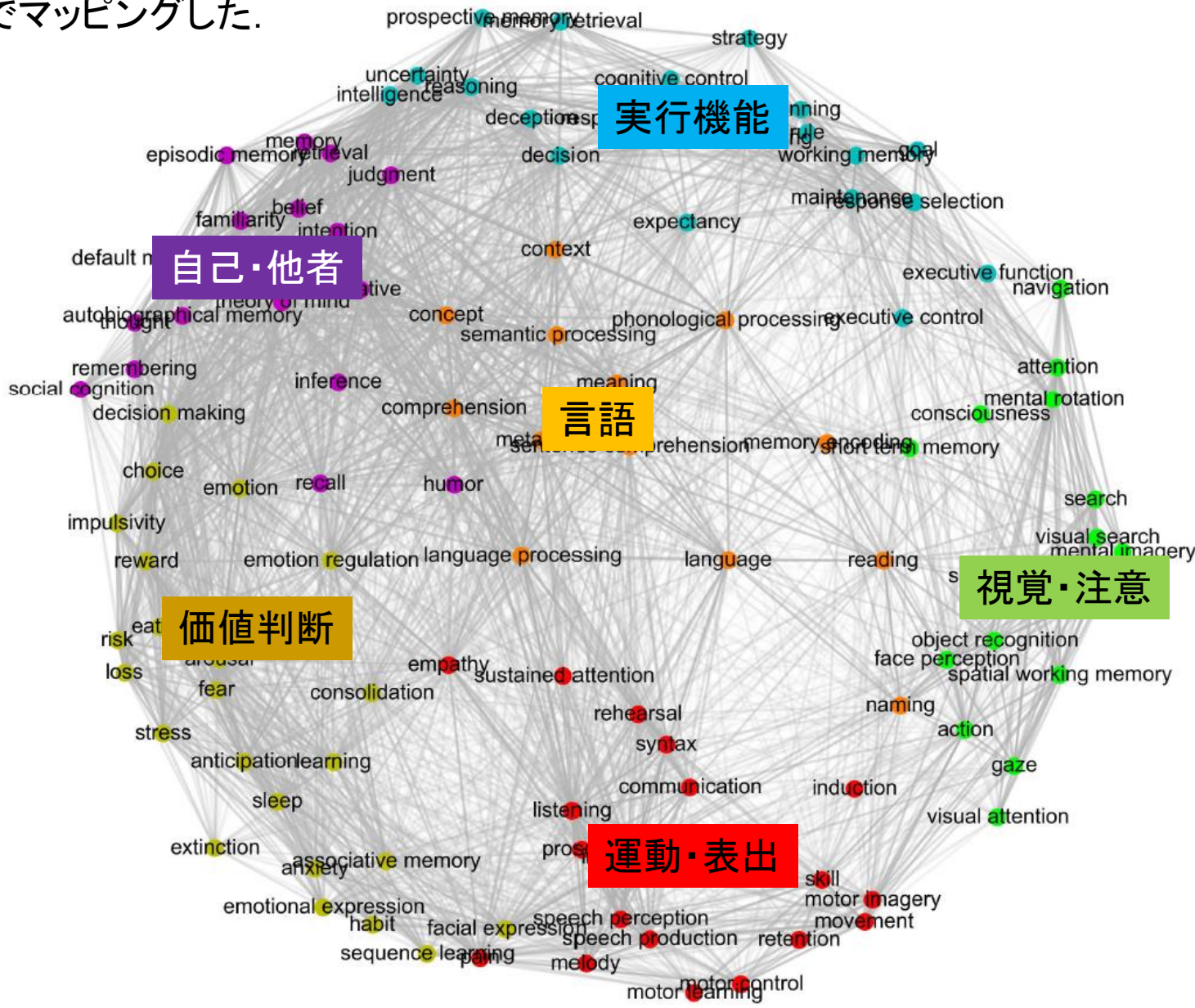
cognitive mapsの間のRSFCを測り, それをもとに
尺度法でマッピングした.

視覚・注意系クラスター



認知機能間ネットワーク

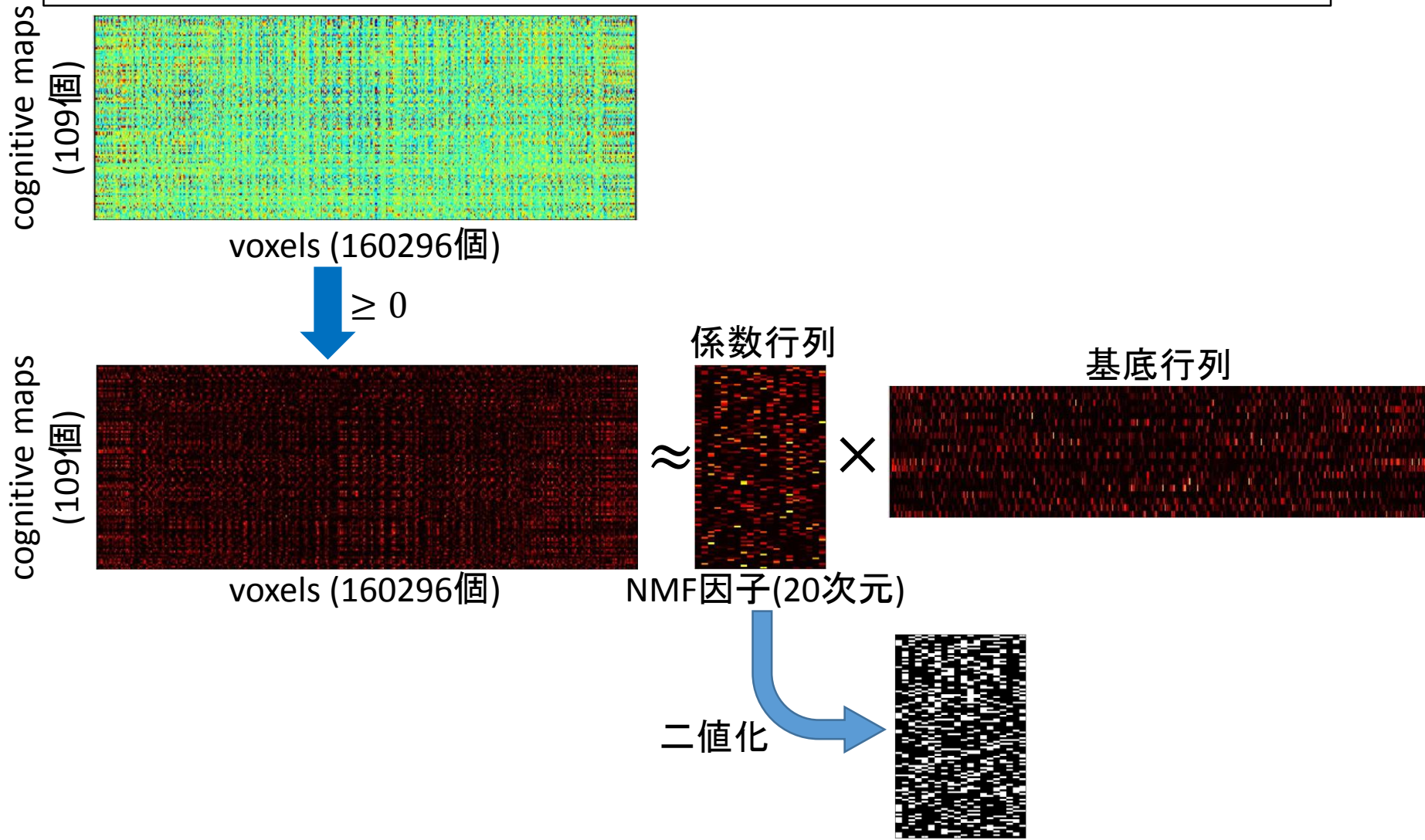
cognitive mapsの間のRSFCを測り、それをもとに認知機能をクラスタに分け、さらに多次元尺度法でマッピングした。



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.

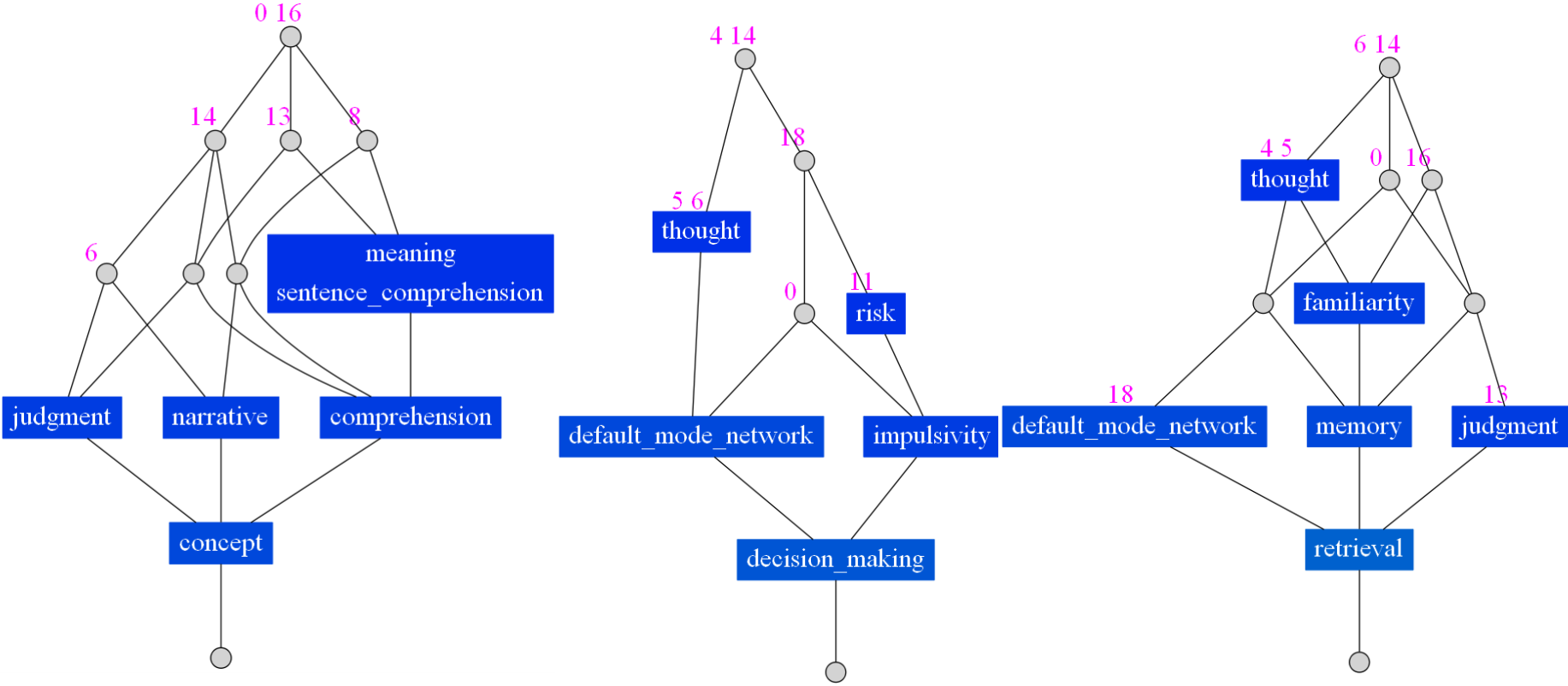
cognitive mapsと全脳voxelsのRSFC行列に対し, NMFを実行し, 係数行列を二値化.



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)