



# エクサフロップス級計算機による人間の脳皮質 規模の神経回路シミュレーション

五十嵐 潤

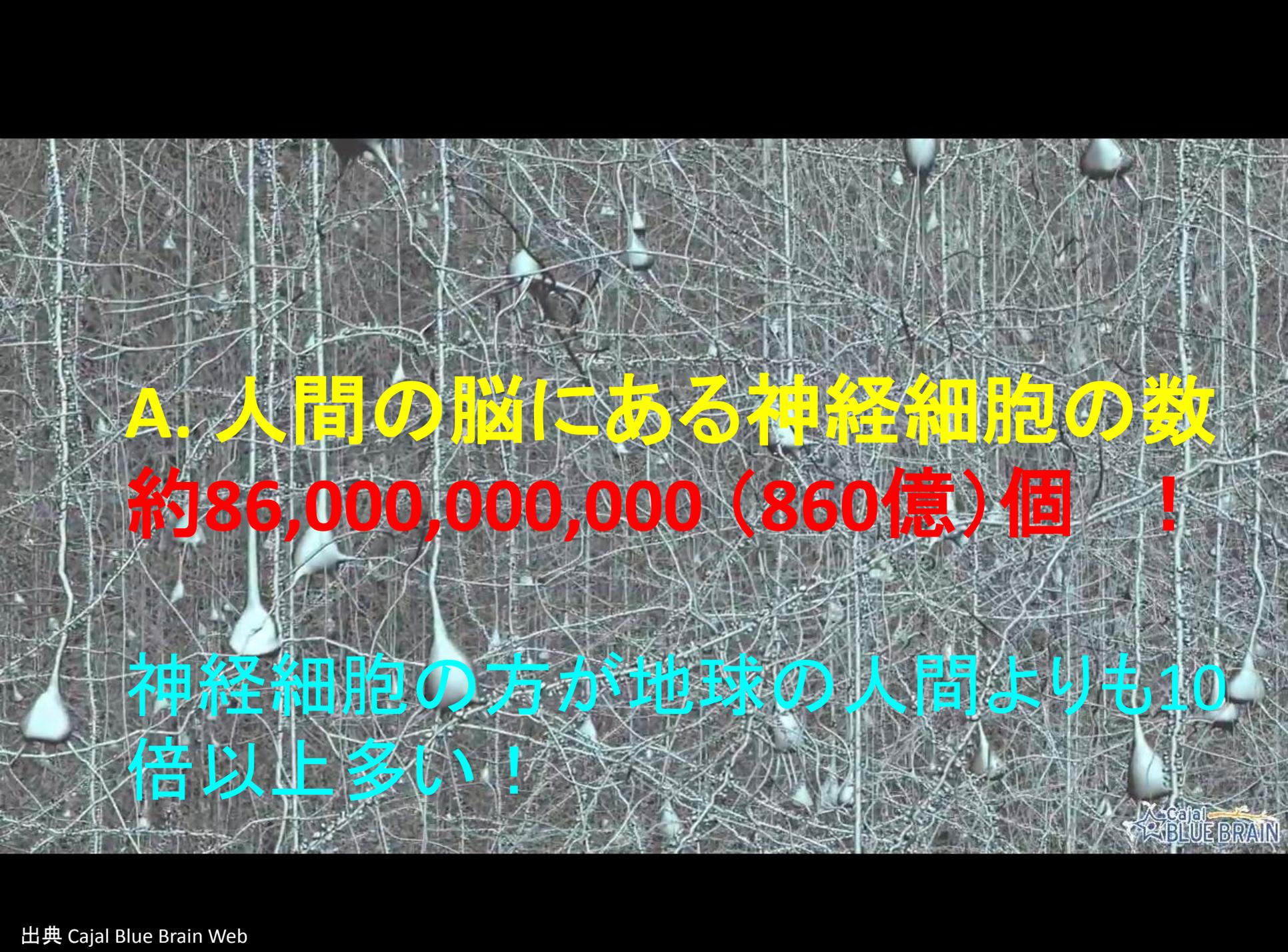
理化学研究所 情報基盤センター  
計算工学応用開発ユニット  
上級センター研究員

ポスト京 萌芽的課題4

# 本日の内容

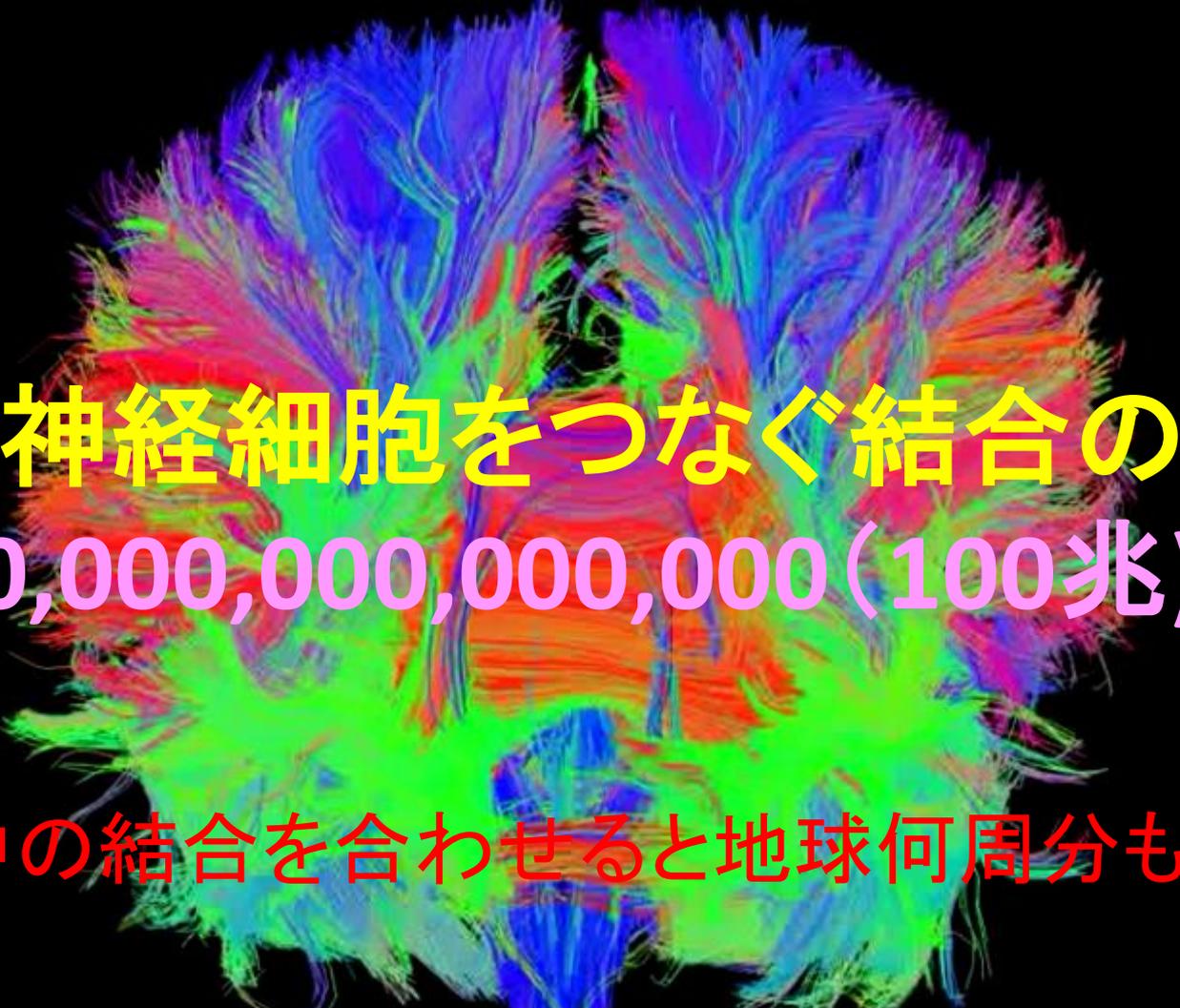
0. 自己紹介
1. 脳の特徴
2. さまざまな脳のシミュレーション
3. 3. ヒト規模の大脳皮質シミュレーションに向けた取り組み

# 1. 脳の特徴

A detailed black and white micrograph of neurons, showing a dense network of branching dendrites and axons. Several large, pear-shaped cell bodies (soma) are visible, each with a prominent nucleus. The text is overlaid on this image.

**A. 人間の脳にある神経細胞の数  
約86,000,000,000 (860億)個！**

**神経細胞の方が地球の人間よりも10  
倍以上多い！**



**A. 神経細胞をつなぐ結合の数**  
約100,000,000,000,000 (100兆)個！

脳の中の結合を合わせると地球何周分もの長さ

脳はこの世で一番複雑な構造物

# 脳の柔軟な思考と創造性



## コンピュータ

- 計算は早い
- 言われたことだけする



1508 g

86000 M

## 人間の脳

- 計算は遅い
- 高度な認識、柔軟な学習
- 創造性

# 脳は超省エネ



世界最速スパコン:  
神威太湖之光(中国)

1537万ワット

(TOP500, 2017年11月時点)



1508 g  
86000 M

人間の脳  
約10ワット  
100万分の1以下

# 脳はまだ未解明

脳が膨大な数の神経細胞や結合によって、どのように情報を処理しているのか、わかっていない

## 困難な問題

神経細胞や結合が複雑で数が膨大なため、全ての活動や相互のやり取りを把握できない。

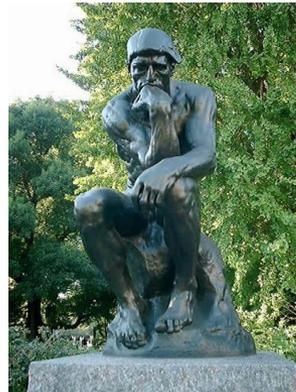
## ★ 脳のシミュレーションの利点

- シミュレーション上では、全ての活動や相互作用を記録できる
- 何度でも、どんな状態でも試せる
- 動物実験の代替ができる

# もし脳が解明できたら...



(C) tezukaosam.net



- 脳の病気の治療
- 効率のいい勉強法
- 人間のように考えるパソコンやロボット
- 我々の存在へのヒント

社会問題の解決、社会への貢献が多数見込める。

## 2. 脳のシミュレーション

# スーパーコンピュータの性能と神経回路シミュレーション規模の推移

演算性能 (FLOPS)

エクサ  $10^{18}$

ペタ  $10^{15}$

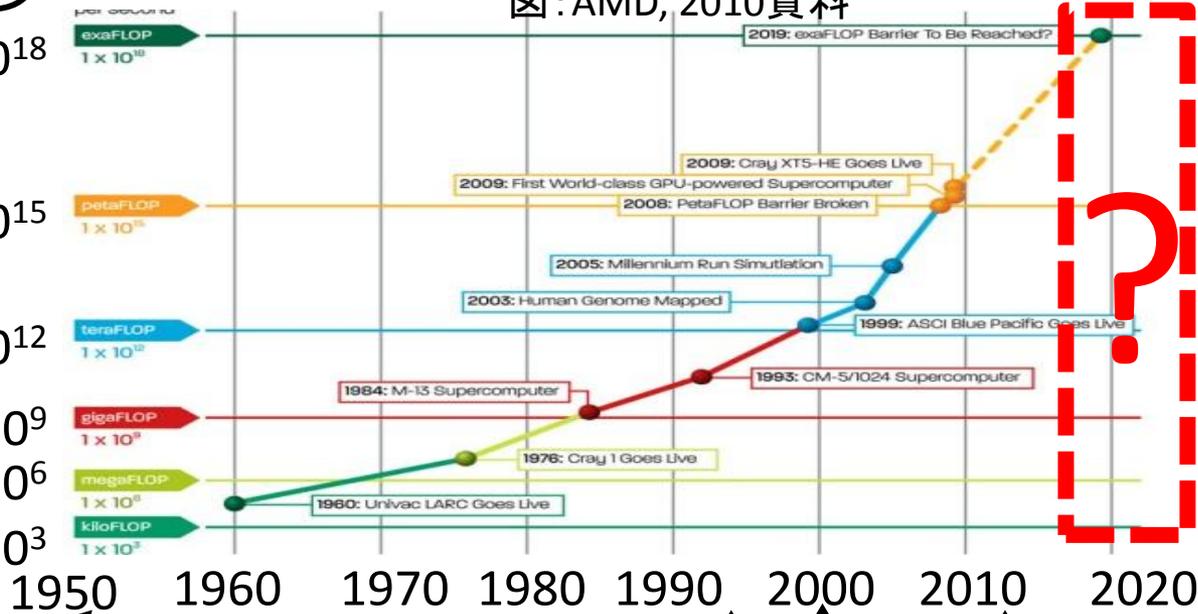
テラ  $10^{12}$

ギガ  $10^9$

メガ  $10^6$

キロ  $10^3$

図: AMD, 2010資料



1神経細胞  
Hodgkin and  
Huxley, 1952

1600個 Destexte et al, 1994

3460個 Traub et al, 2000

100万個 Izhikevich and edelman, 2008

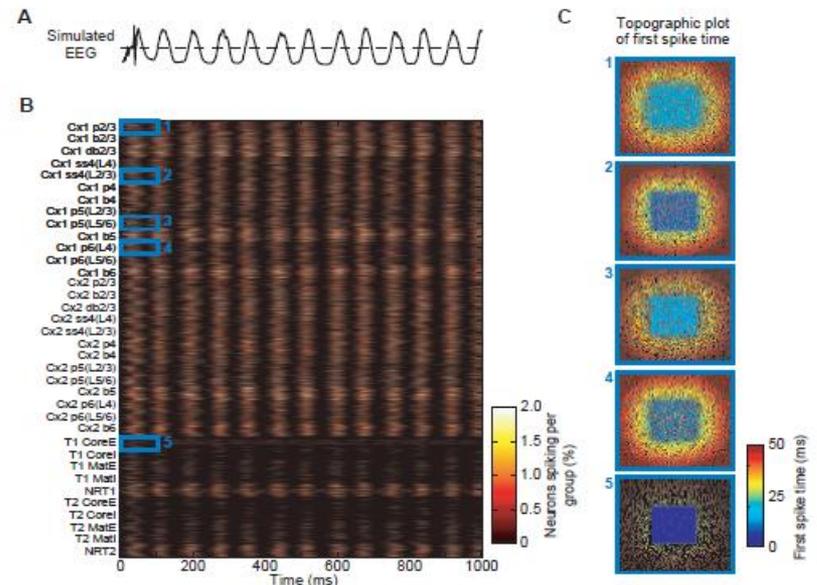
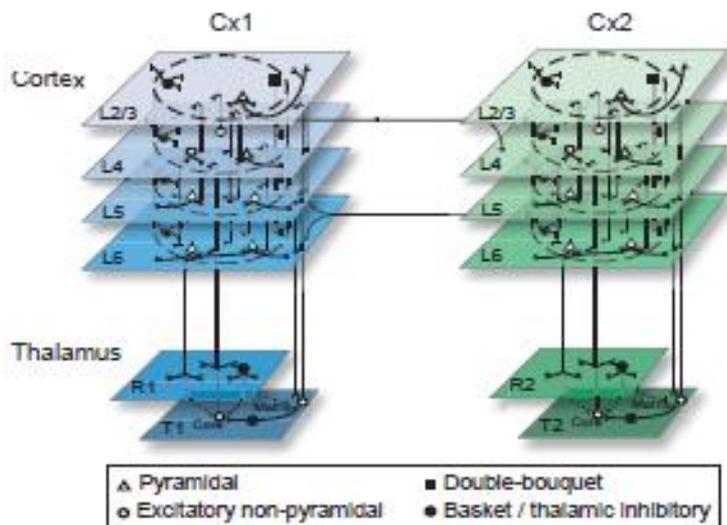
16億個 Ananthanarayanan et al., 2009

17億個  
Kunkel et al., 2013

シミュレーション規模は、ムーアの法則に従う計算機性能上昇とともに拡大。  
2020年頃にはエクサ級の計算機でどれだけ拡大するか？

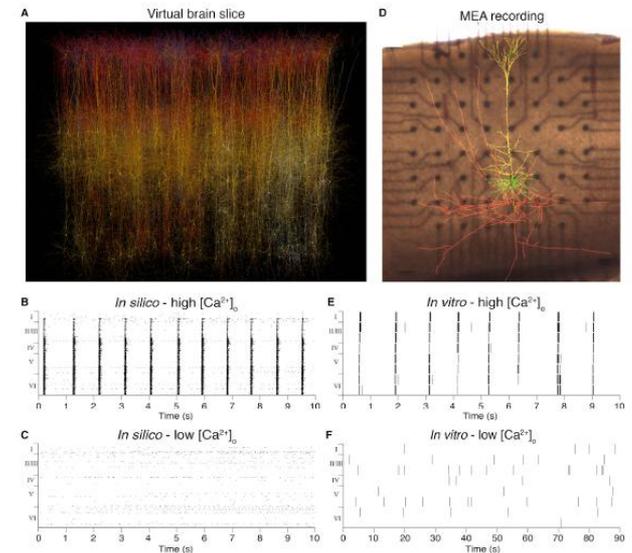
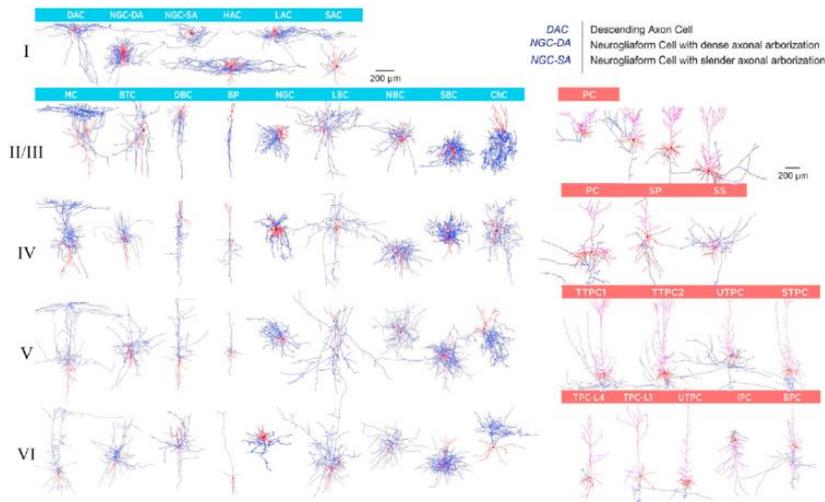
# ネコの脳規模の新皮質—視床の神経回路モデル (Ananthanarayanan et al., 2009)

- 新皮質と視床の神経回路モデル
- ネコの脳の規模に匹敵する16億個の神経細胞と8.8兆個のシナプス結合
- $\alpha$ 周波数帯(約10Hz)の集団的な振動活動が発生
- IBMのスーパーコンピュータBlue Gene/Pを利用(147456 CPUと144TBのメモリー)



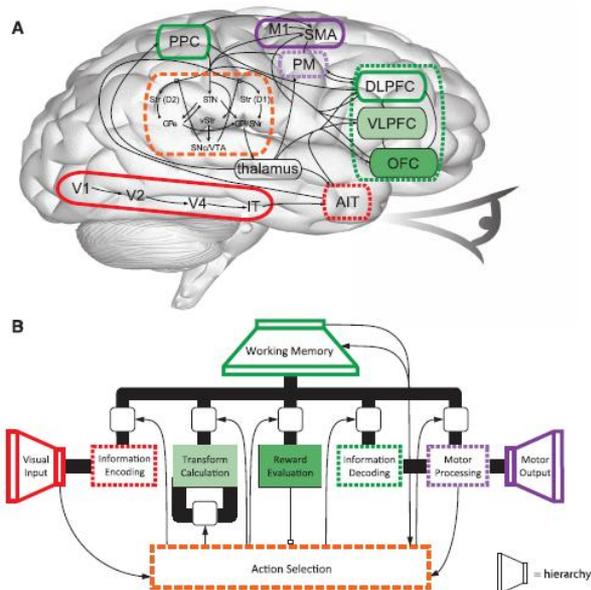
# ラットの体性感覚皮質 (Markrum et al. 2015 Blue Brain Project)

- 体性感覚皮質、31,000 神経細胞をシミュレーション
- 207 morpho-electrical neuron subtypes
- 計算機: EPFL Blue Brain IV (Blue Gene/Q, 65,536 コア、839 TFLOPS, Swiss National Supercomputing Center)
- シミュレータ: NEURON simulator
- 皮質神経回路について多数の予測



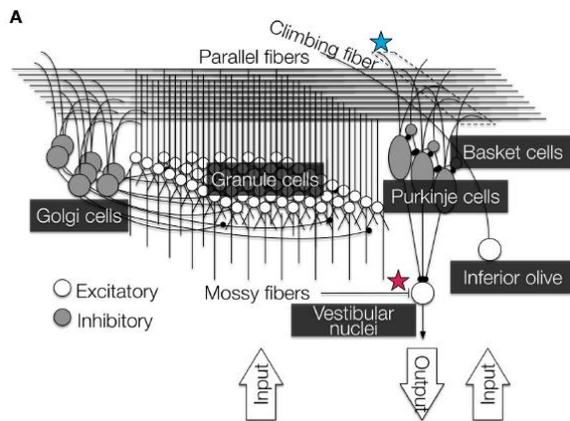
# 知的なタスクを実行できる神経回路モデル： Spaun (Eliasmith et al., 2012)

- 脳の各領域で想定される機能を実行する神経回路モデルを組み合わせたモデル。
- 250万個の神経細胞モデル
- デスクトップコンピュータで実行可能
- 8つの知的タスクを実行することができる



# ネコの規模の小脳(10億神経細胞)のリアルタイムシミュレーション (山崎 (電気通信大学)et al., ,2016)

- 10億個の神経細胞からなる小脳の神経回路モデル
- 視機性眼球運動に関する活動を再現
- 脳表面62 x 64 mm<sup>2</sup>
- Green 500 第3位の苜蒲を用いて実行(理研情報基盤センター)
- Intel Xeon + PEZY SC (MIMD, 1024 cores、2 PETA FLOPS)

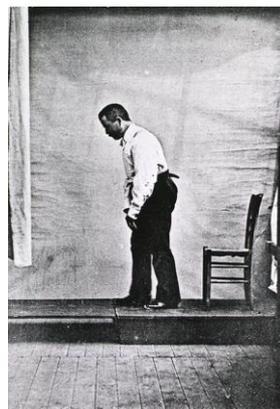


モデル模式図

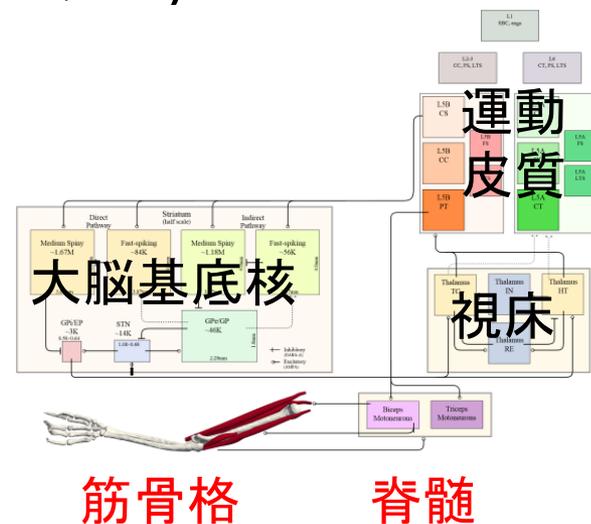


# 大脳皮質—視床—基底核の神経回路モデルによるパーキンソン病の運動症状の研究(HPCI戦略プログラム)

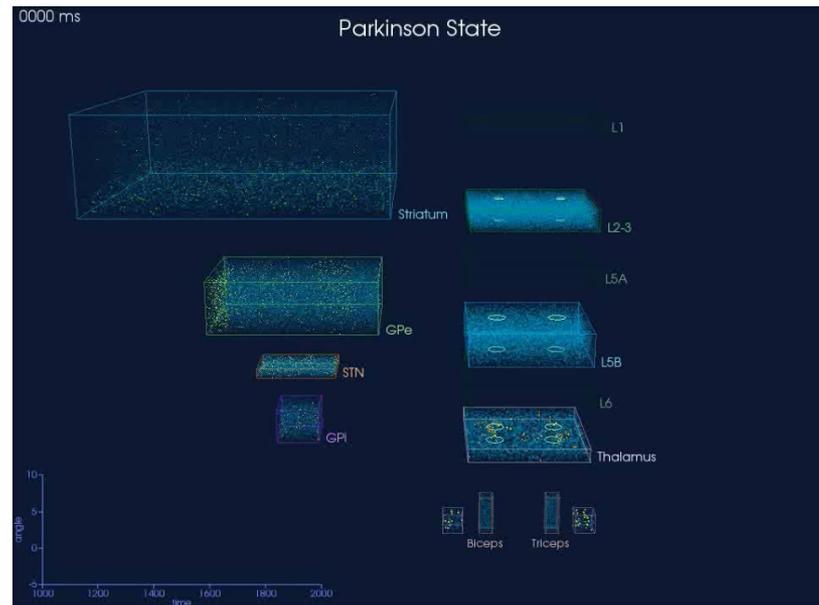
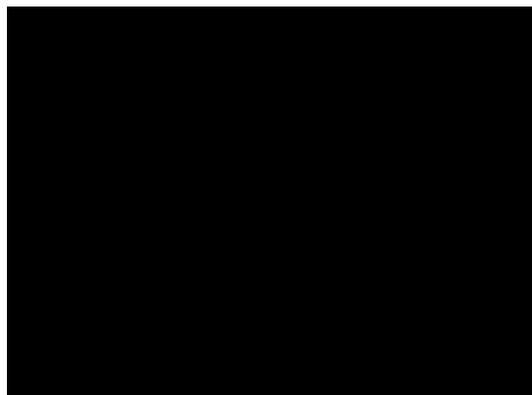
- パーキンソン病:ドーパミン減少による異常ベータ振動や運動症状



- 運動皮質—視床—大脳基底核—脊髄—筋骨格の統合モデル(約300万細胞)を京コンピュータの8192コアで計算



- 大脳基底核のベータ振動機構や震えの発生機構を示唆

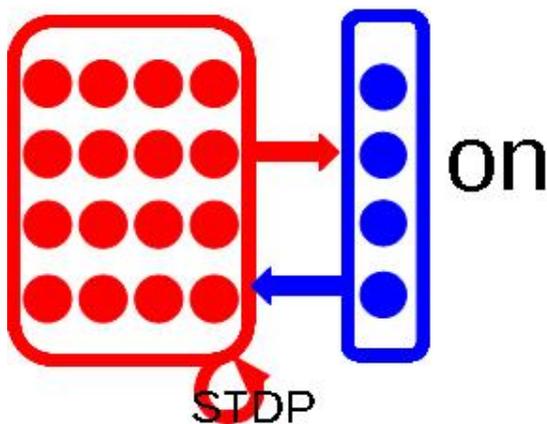


# 京コンピュータを用いた大脳皮質局所神経回路シミュレーション(Kunkel et al., 2013)



Dr. Markus Diesmann and Dr. Abigail Morrison, Juelich Research Centre

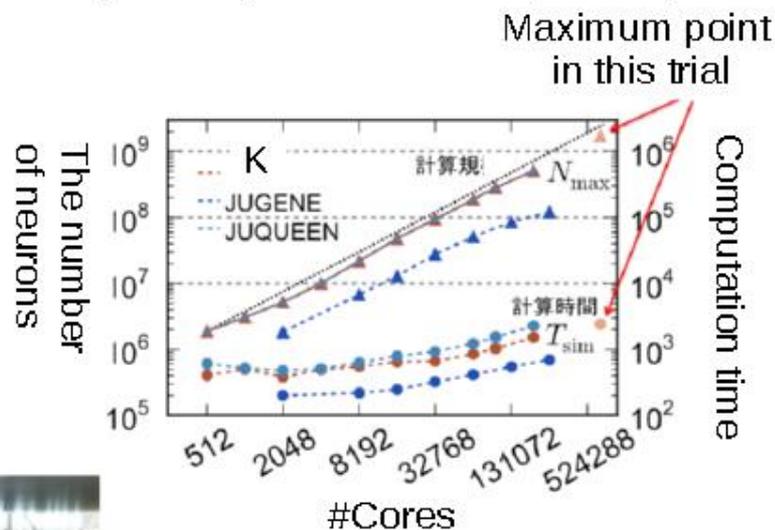
Balanced random network with spike-time-dependent plasticity (Morrison et al., 2007)



K computer  
705,024 CPU cores,  
~1.3PB memory  
11.28 Peta FLOPS

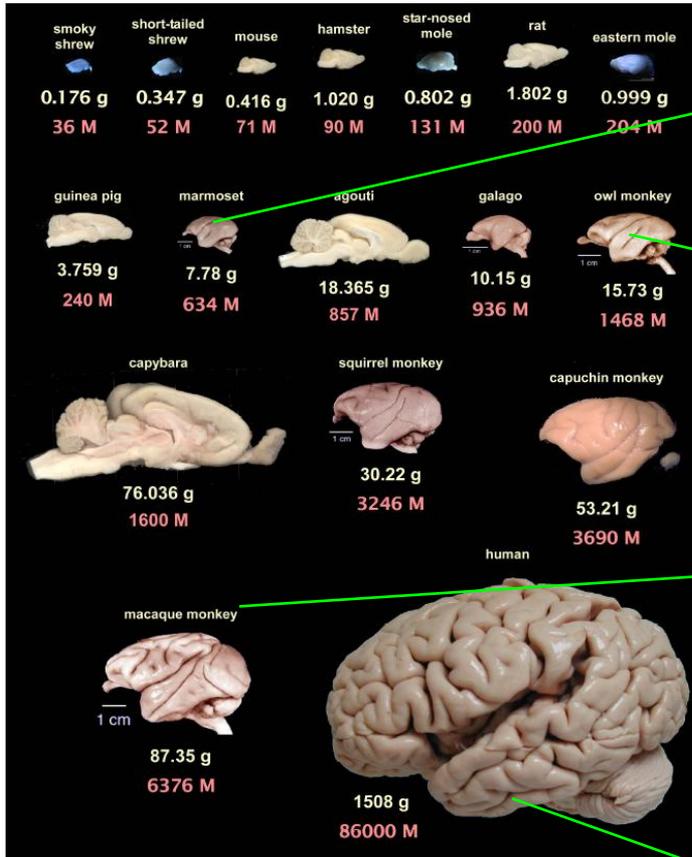


Marmoset brain:  
634 million neurons



京で17億3000万個の神経細胞と10兆4000億個のシナプスのシミュレーション実行を確認(2013年プレスリリース)

# 京で実行した神経回路モデルの規模と動物の脳の神経細胞数



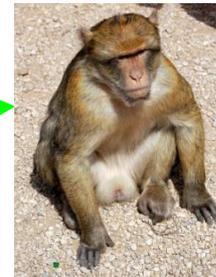
Herculano-Houzel, 2009



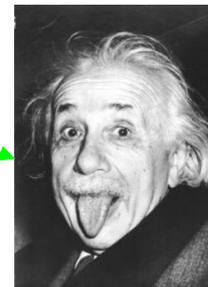
マーモセット  
約6億個



ヨザル  
約14億個



マカクザル  
約63億個



ヒト  
約860億個

京で17億個

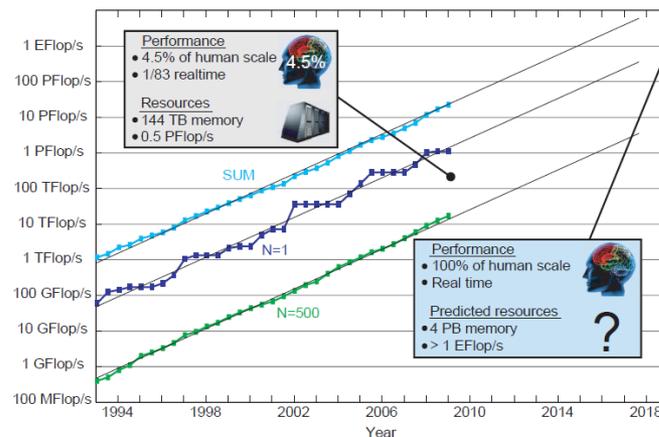
京では小型のサル程度の規模のモデルの実行が可能であることがわかった。さらに60倍規模を拡大すると人間の規模に達する。

# ヒト全脳規模の神経回路モデル実行に必要な計算性能

- エクサフロップス級の性能で、ヒト全脳モデルの1秒分のシミュレーションを、数時間程度で実行可能との見積もり
- “11PFLOPSの京で17億神経細胞”から外挿すると、1EFLOPSで1700億(>ヒト860億個)
- 同様の予測が、IBMのネコ規模脳のシミュレーションを行ったグループからも出されている。(Ananthanarayanan et al., 2009)。

計算科学ロードマップより

細胞数とシナプス数	
細胞数	$10^{11}$
コンパートメント数/細胞	5000
シナプス数/細胞	10000
FLOP/1秒	
細胞	$10^{21}$
シナプス	$10^{19}$
データ量	
細胞	$1.6 \times 10^{17}$
シナプス	$4.8 \times 10^{16}$
主記憶B/F	0.11

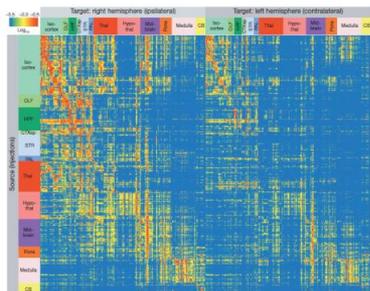


Ananthanarayanan et al., 2009

# 全脳神経回路モデル構築に必要なデータ

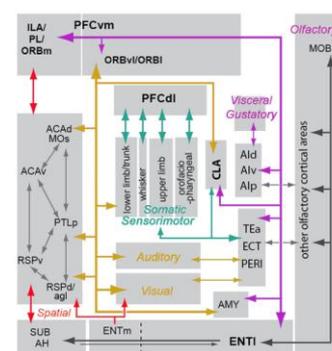
- 2000年代に入り、遺伝子技術、コネクトームの測定技術が急速に発達し、全脳モデル構築に必要な脳のデータが急速に出現してきている。
  - 神経細胞間に関する結合データ(マクروسコピック、メゾスコピック)
  - 構成神経細胞種の同定
  - 大脳皮質の脳地図
- 数年～10年以内に様々な動物の脳のデータが爆発的に出現する。

Mouse connection matrix



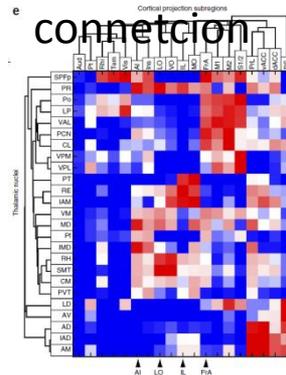
Oh et al., 2014

Mouse neocortex Connectome



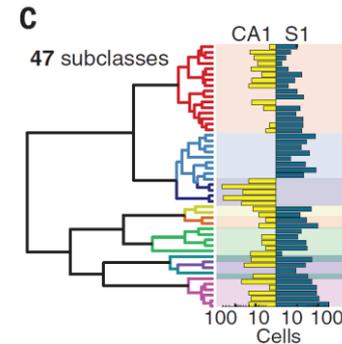
Zingg et al., 2014

Mouse thalamocortical connection



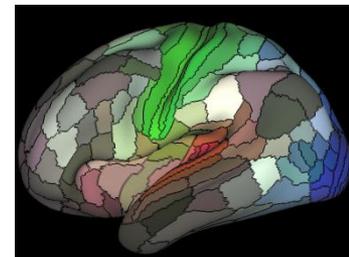
Hunnicutt et al., 2014

Mouse cell types identification



Zeisel et al., 2015

Human brain map



Glasser et al., 2016

# 2022年、“ポスト京”でヒト全脳規模の脳シミュレーションを！

ポスト京萌芽的課題 思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用  
(代表: 沖縄科学技術大学院大学 銅谷賢治)

2017年 京  
11 PFLOPS

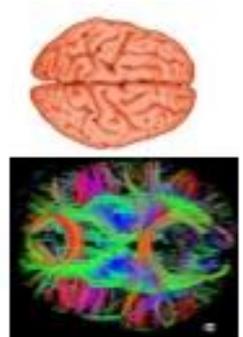
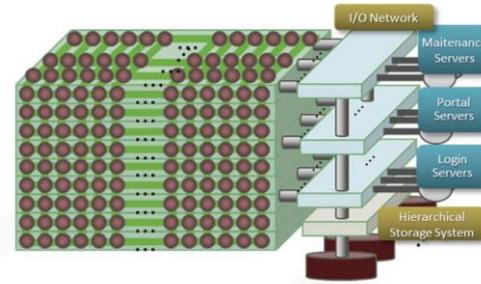


小型のサルの脳規模

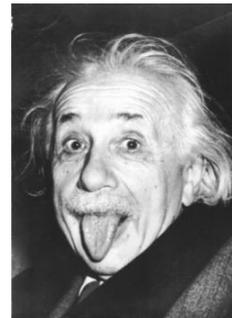


ヨザル  
約14億個

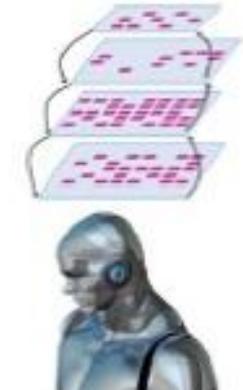
2022年 ポスト京  
~1EFLOPS



人間の脳規模

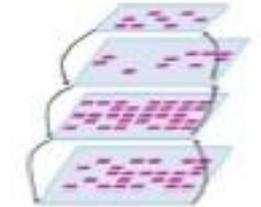


ヒト  
約860億個



京の百倍の性能のポスト京で全脳規模のシミュレーションを実現し、脳のしくみや脳の病気の解明、人工知能への応用を目指す

# ポスト京 萌芽的課題4思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用(2016年8月-2020年3月)



## 人工知能

脳型AI  
石井(京大)



BriCA  
高橋(理研)



深層学習  
原田(東大)



## 結合解析、哺乳類全脳シミュレーション

結合解析  
大羽(京大)



大脳皮質  
五十嵐(理研)



小脳  
山崎(電通大)



大脳基底核  
銅谷(沖縄科技大)



## 昆虫全脳シミュレーション

神崎(東大)



海馬  
立野(九工大)

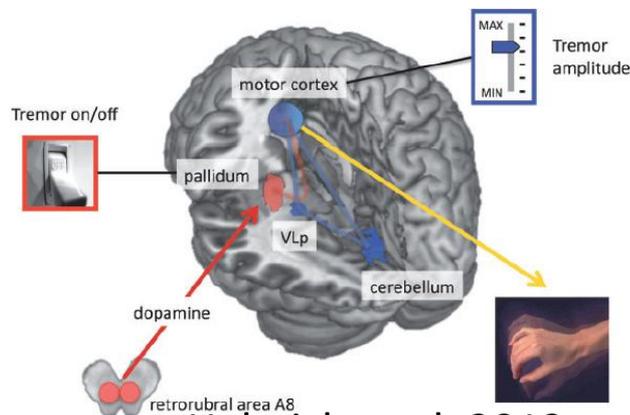
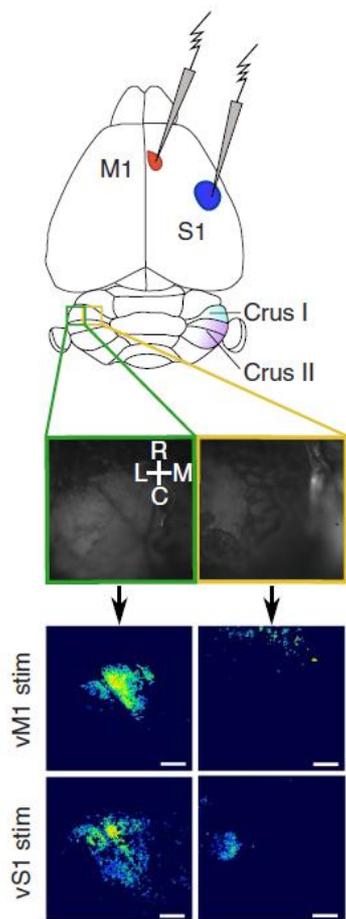
NEST simulator  
Diesmann (JRC)

視覚皮質  
稲垣(中部大)



# エクサスケールコンピューティングで可能になる大規模神経回路シミュレーションのターゲット: 複数脳領域間の相互作用による情報処理と神経疾患

- 脳は複数の脳領域が相互に協調し複数のモダリティに関する処理、異なる種類の処理を行う領域が相互作用している。例えば、大脳皮質、小脳、大脳基底核がどのように相互作用し、処理を行っているか良くわかっておらず、シミュレーションのターゲットとなる。
- パーキンソン病、てんかん、うつ病など多くの脳の疾患の場合においても、複数の脳領域が直接、間接的に影響し合い発生する。その機構解明に全脳規模のシミュレーションによる、複数脳領域のシミュレーションが有効。

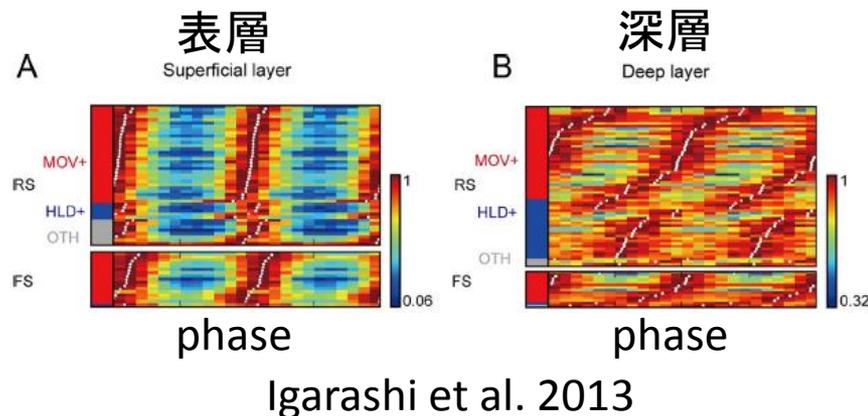
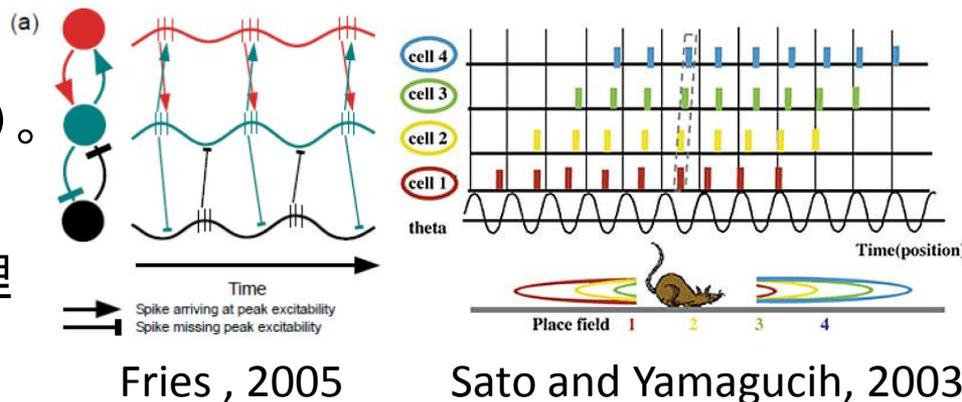


Proville et al., 2014

Helmich et al. 2012

# エクサスケールコンピューティングによる大規模神経回路シミュレーションのターゲット：脳の振動的神経活動による情報処理

- 脳では、神経細胞集団が同期して様々な周波数帯の振動的活動を発生する ( $\theta$ : 4-8Hz、 $\alpha$ : 8-15、 $\beta$ : 15-40  $\gamma$ : 40-200Hz)。
- 行動特異的に振動は発生し、情報処理に関わるとみられるが、よくわかっていないことが多い。
- 神経疾患で異常な振動的活動がよく見られ、疾患の機構解明にも重要である。
- 振動的活動は神経細胞集団の協調した活動であり、大規模シミュレーションで扱うことができる。



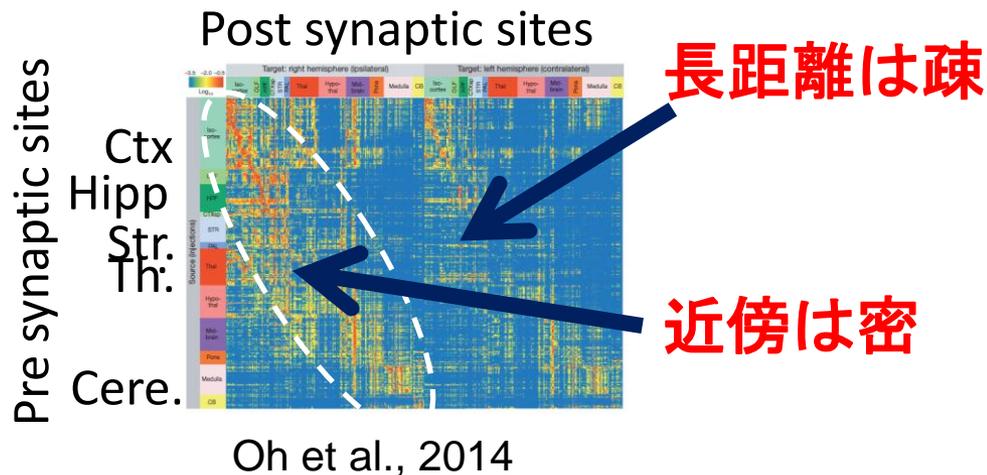
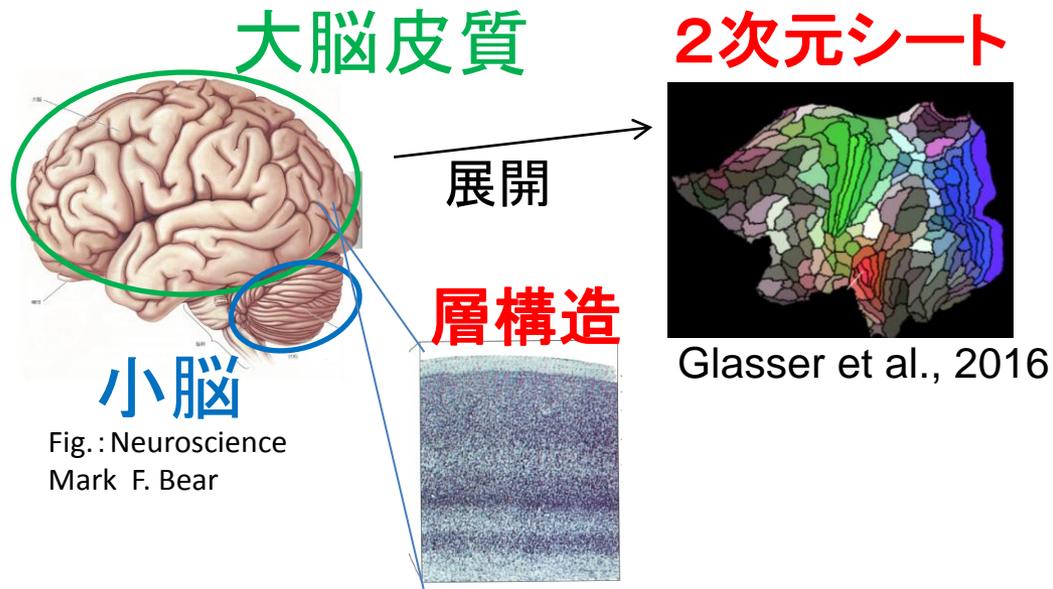
Tachibana et al., 2011

- 振動的活動は人工知能にない大きな特徴で、応用の可能性がある。

### 3. ヒト規模の大脳皮質シミュレーションに向けた取り組み

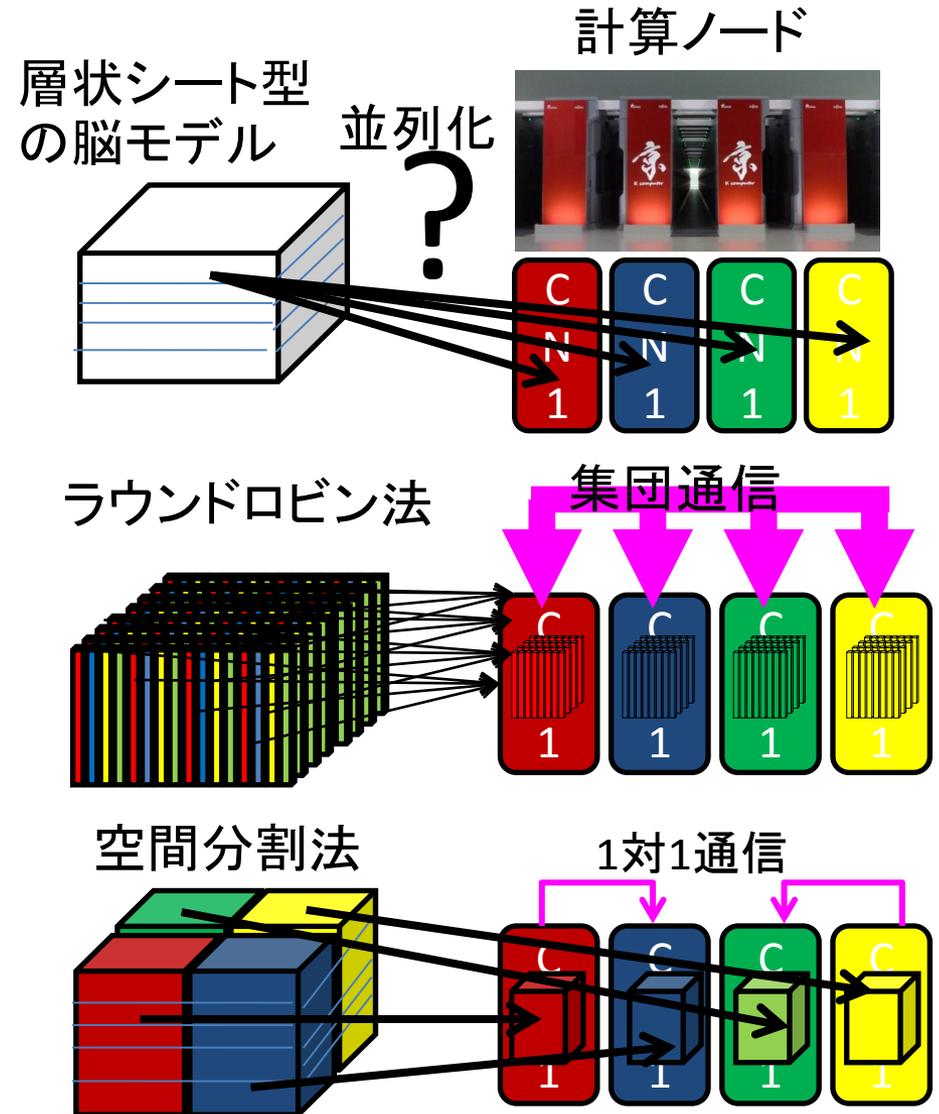
# 脳の神経回路構造: 近傍が密で遠方は疎な結合を持つ層状シート

- 99% の神経細胞は大脳皮質(20%)と小脳(80%)に含まれる (Herculano-Houzel, 2009)
- 大脳皮質と小脳はミルフィーユのような、**層状のシート構造**である。
- 結合は脳領域内近傍(1mm)で密で、脳領域間(>1mm)では疎



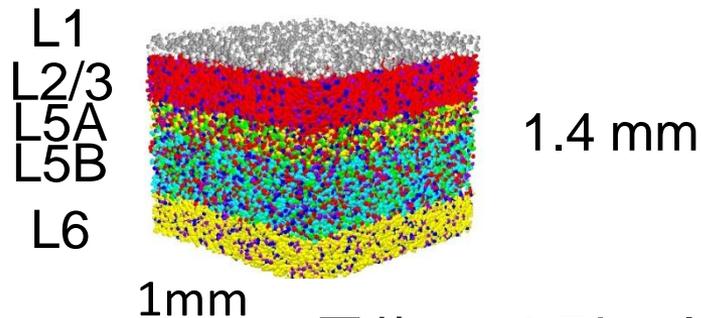
# 層状シート型神経回路をどうやって並列計算するか: タイル分割

- 2つの並列化法:
  - ラウンドロビン法: ロードバランス、集団通信
  - 空間分割法: 局所的な空間構造保持、1対1通信
- ロードバランス: 両方可
- 通信: 結合の空間構造を利用した効率化
- 近傍が密で遠方は疎な結合の層状シートを考慮し, 空間分割法であるタイル分割を適用する



# 層状シート型大脳皮質モデル

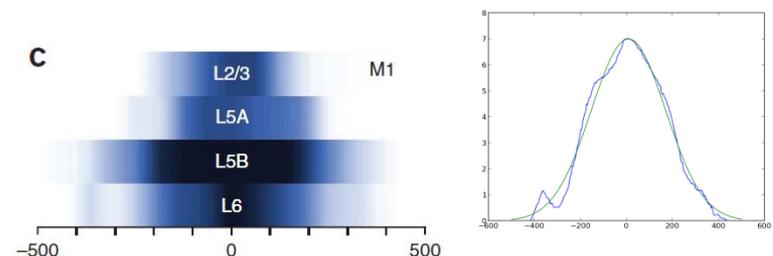
- 層: 1, 2/3, 5A, 5B, 6
- 層の厚み (Weiler et al 2008), 細胞密度 (Lev and White 1997)
- 神経細胞数:  $38,000 / 1\text{mm}^2 = 1\text{タイル}$
- 神経細胞モデル: Leaky integrate-and-fire neuron model
- 結合の空間範囲: 2D Gaussian function (Weiler et al. 2008, Katznel et al., 2010, Apicella et al., 2012)



層状シート型の大脳皮質モデル

$$\tau_m \frac{dv}{dt} = -v + RI(t)$$

if  $v > v\_threshold$ , then  $v \leftarrow v\_reset$



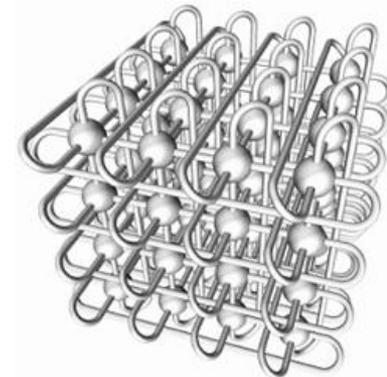
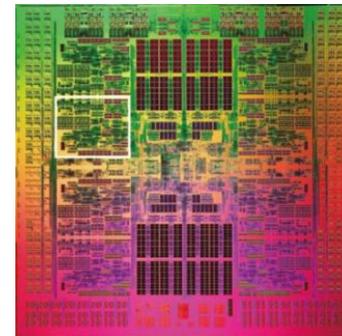
Katznel et al., 2010

# 計算環境

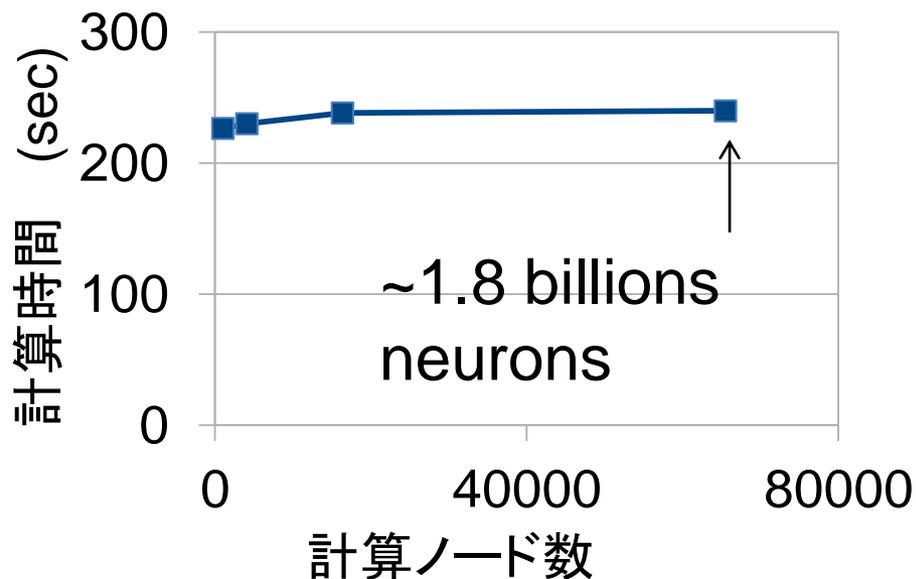
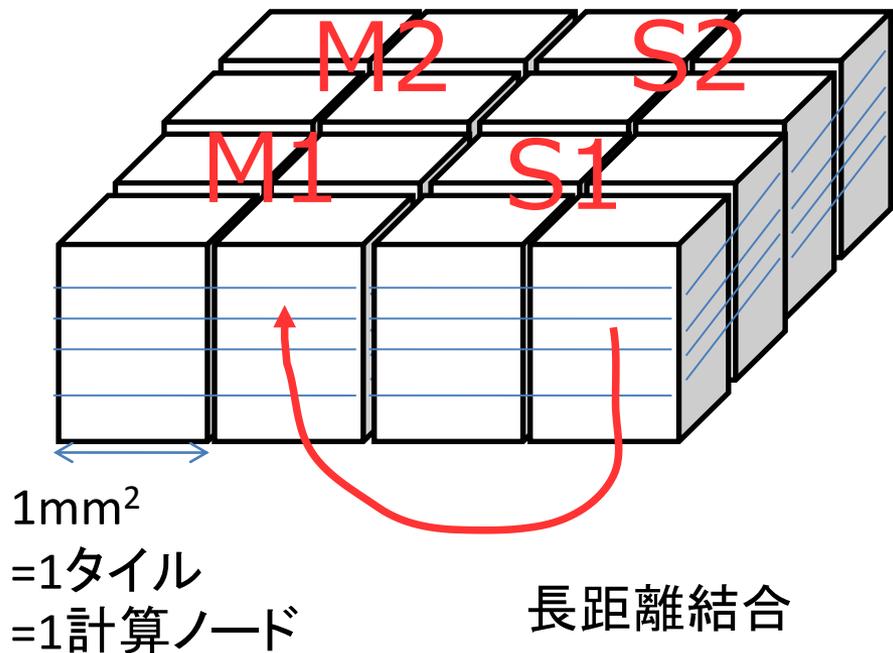
## ★京コンピュータ(計算科学研究機構, 日本)

- CPU: Fujitsu SPARC64 VIIIfx
- CPU数: 88,128 (~11 PFLOPS)
- Memory: ~1.3PB
- Network: ToFu interconnect (6D torus)

## ★プログラミング言語: C, Message Passing Interface (MPI) library



# 近傍で密、遠方で疎な結合を持つ、複数領域を持つ層状シート型 大脳皮質モデルのタイル並列化

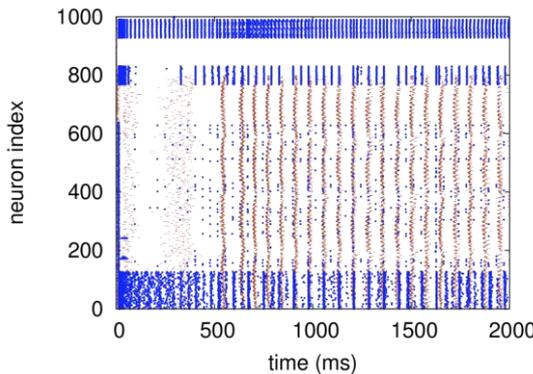
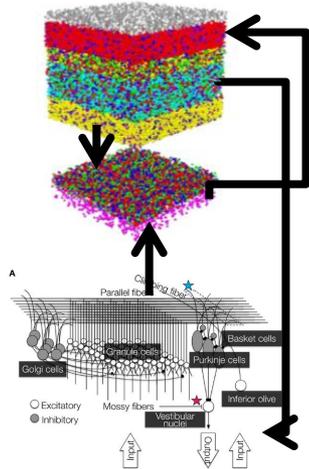


タイル並列と通信回数削減法を適用し、良好な弱スケーリング性能が得られた。

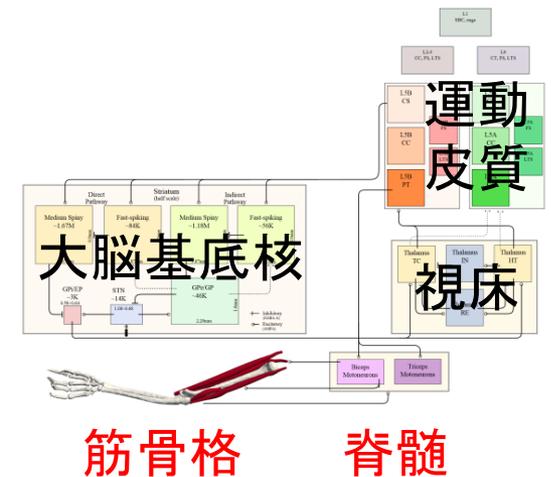
計算ノード数の上昇でさらなる規模拡大が期待できる。2022頃には、エクサスケール計算機のポスト京でヒト規模の大脳皮質モデルを実施する予定。

# まとめ

- 局所的に疎で遠方には疎な結合を持つ層状シート型の大脳皮質神経回路モデルについて、効率的な並列化法と通信法について調べた。
- タイル並列化と長距離結合の通信頻度削減法によって、層状シート型モデルの、理想的な弱スケール性能が得られ、約18億神経細胞のシミュレーションが実現した。エクサフリップス級の次世代計算機で人間規模の大脳皮質シミュレーションが期待できる。
- 次の課題は、大脳皮質－視床、小脳、大脳基底核からなる全脳モデルをエクサフリップス級の計算機で実現し、運動や思考に関する情報処理機構の解明を目指すことになる。



山浦、2017、神経回路学会



筋骨格 脊髄  
戦略プログラム、2013

# 謝辞

- Shigeyuki Oba, Shin Ishii (Kyoto University)
- Tadashi Yamazaki, Hiroshi Yamaura (University Elector-Communication)
- Kenji Doya, Carlos Enrique Gutize (Okinawa Institute of Science and Technology)
- Koichi Takahashi (RIKEN QUBIC)
- Tatsuya Harada, Yoshitaka Ushiku (Tokyo University)

This work was supported by Post K Exploratory Challenge #4 "Understanding the neural mechanisms of thoughts and its applications to AI"