

2017 年度名古屋大学学生論文コンテスト

優秀賞受賞

全脳シミュレーションは可能か

理学部1年 中野 寛矢

# 全脳シミュレーションは可能か

## I はじめに

近ごろ「深層学習(Deep Learning)」という言葉をよく耳にするようになった。深層学習とは、ヒトの神経回路<sup>1</sup>を模擬した「ニューラルネット」というモデルを用いてコンピュータが自ら学習するというものである。近年、この深層学習の登場をきっかけとして、汎用人工知能<sup>2</sup>である脳型コンピュータの製作を目標とした、脳科学と人工知能を結ぶ研究が強力に推進されている。神経細胞の結合をコンピュータ上で再現するコネクトーム<sup>3</sup>や神経細胞を模したチップであるニューロモルフィック・チップ<sup>4</sup>の研究プロジェクトはその一例として挙げることができる(西垣通 2016 pp.84-99)。

そういった研究の1つとして、生物の神経細胞の生理学的な構造や機能を分子レベルからコンピュータ上で再現する「全脳シミュレーション」の研究に大きな関心が寄せられている<sup>5</sup>。全脳シミュレーションは、実際の脳を用いては困難な、脳の働きの可視化を可能にする。このことから、脳の仕組みの解明・未知の脳機能の解明には、リアルタイムでの全脳シミュレーションを実現させることが不可欠であるとされる(神崎亮平 2014 p.83、宮本大輔他 2015 p.630)。しかし、以前から研究されているにもかかわらずヒトの全脳シミュレーションは未だに成功していない。

本稿では、こういった背景を持つヒトの全脳シミュレーションを実際に実現させるには何が必要かについて追及する。まず、現在行われている全脳シミュレーションの研究をいくつか紹介し、現在のスーパーコンピュータの計算性能がヒトの全脳シミュレーションに必要な計算性能に足りていないことを示す(第II節)。次いで、現在のスーパーコンピュータの計算性能がリアルタイムでのヒトの全脳シミュレーションに必要な計算性能にどの程度足りていないのかを示し、現状のコンピュータの発展速度ではリアルタイムでのヒトの全脳シミュレーションがいつ実現するかを考察する(第III節)。さらに、このままの発展速度でスーパーコンピュータの計算性能が発展するにあたって妨げになるであろう問題と、その解決策について考察する(第IV節)。最後にヒトの全脳シミュレーションが実現した暁にはどのような世界が待ち受けているのかについて考える(第V節)。

## II ヒトの全脳シミュレーションの実現には何が足りないか

### 1 現在行われている全脳シミュレーションに関する研究

現状、ヒトの全脳シミュレーションの実現には至っていないが、ヒトの脳の一部や昆虫の全脳シミュレーションの研究が実施されている。以下にそれらの研究の例を挙げる。

## (1) 日本とドイツの共同チームによる「京」を使ったシミュレーション

理化学研究所<sup>6</sup>、ユーリッヒ研究所<sup>7</sup>、沖縄科学技術大学院大学<sup>8</sup>が、2013年7月にスーパーコンピュータ「京」<sup>9</sup>の全計算ノード<sup>10</sup> 82944個を使用し、17億3000万個のニューロンが10兆4000億個のシナプスで結合されたヒトの脳の神経回路のシミュレーションに成功した。その神経回路は脳科学における実験動物として注目されているマーモセットなどの小型霊長類のサルの特長の規模に達しており、脳の神経回路のシミュレーションとしては世界最大である。しかし、この神経回路はヒト脳の神経回路の1パーセント程度に過ぎず、また、生物学的には1秒に相当する計算に約40分もかかっている(理化学研究所 2013)。

## (2) 昆虫の脳の全脳シミュレーション

### a なぜ昆虫の脳をシミュレーションするのか

昆虫とヒトは全く異なる生物であるため、昆虫の全脳シミュレーションとヒトの全脳シミュレーションには関連性がないと思う方もいるかもしれない。しかし、昆虫の脳のニューロンの働きや形状は人間の脳のものと同様である(神崎亮平 2005 p.28)。また、コオロギの同種間での喧嘩行動(Stevenson, P. A. *et al.* 2000 p.113)・物体の特徴や差異を認識し学習するミツバチ(Giurfa, M. *et al.* 2001 p.930)・嗅覚学習及び記憶をするゴキブリ(水波誠他 1999 pp.69-70)などに代表されるように、昆虫は十分複雑な知能を持っているとされる。

一方、昆虫の脳の神経回路の規模はヒトの脳のものに比べて小さい。人間の脳のニューロン数は約860億個と言われており(Herculano-Houzel, S. 2009)、1ニューロンに約1万シナプスが結合している(前川喜平 2008 p.75)。これに対して昆虫の脳のニューロン数は約10万~100万個しかなく、1ニューロンあたり約100シナプスしか結合していない(加沢知毅他 2015 p.90)ため、小規模のシミュレーションで済むというメリットがある。

これらの事実から、昆虫の全脳シミュレーションはヒトの全脳シミュレーションをする以前に行うに相応しいと考えられる。

### b 現在行われている昆虫の全脳シミュレーションの研究

東京大学先端科学技術研究センターでは、昆虫の全脳シミュレーションの研究として「京」を用いてカイコガの嗅覚—運動系シミュレーションを進めている。カイコガの嗅覚—運動系シミュレーションにおいて、脳が環境に対応して即座に反応するという重要な機能であるリアルタイム性を実現させるため、生物学的には1秒に相当するシミュレーションを1秒以内に行うというリアルタイムシミュレーションを目指した。その結果、1つのニューロンを複数の計算ノードで分割して計算することで、カイコガ嗅覚—運動系ニューロン10368個を実際の時間の約2倍の時間をかけてシミュレーションすることに成功している(宮本他 2015 p.635)。

また、786752個の細胞を実際の時間の約86倍の時間をかけてシミュレーションすることにも成功している(Miyamoto, D. *et al.* 2012 p.1541)。

## 2 なぜヒトの全脳シミュレーションは成功していないのか

以上に示したように、現状はカイクガの脳ですらリアルタイムシミュレーションには成功しておらず、ヒトの脳の神経回路のわずか 1%のシミュレーションにすら、生物学的には 1 秒に相当する計算に約 40 分、すなわち実際の 2400 倍の時間を要している。このことから、ヒトの全脳シミュレーションが実現していない理由は、現在のスーパーコンピュータの計算性能が不足していることであるとわかる。

では、将来スーパーコンピュータの計算性能がヒトの全脳シミュレーションを可能とする程度まで上がることはあるのだろうか。

### III ヒトの全脳シミュレーションはいつ実現するか

#### 1 ヒトの全脳シミュレーションに必要な計算性能

まず、そもそもヒトの全脳シミュレーションに必要な計算性能がどの程度なのかが重要である。表 1<sup>11</sup>に昆虫とヒトの脳におけるリアルタイムでの全脳シミュレーションの計算規模見積もりを示す。

表 1 では、神経回路の細胞・シナプス・可塑性<sup>12</sup>のそれぞれにおいてリアルタイムシミュレーションに必要な計算性能を示している。計算性能の単位は FLOPS<sup>13</sup>である。表 1 によると、「詳細なモデルを用いたヒトの全脳規模の神経回路シミュレーション」に必要な計算性能は約  $3 \times 10^{21}$ FLOPS である。また、「カイクガ全脳の神経回路のリアルタイムシミュレーション」に必要な計算性能は約  $7 \times 10^{16}$ FLOPS である。

ここから、ヒトの全脳シミュレーションに必要な計算性能は、「京」の計算性能である  $10^{16}$ FLOPS より 5 ケタも大きく途方もない性能であることが分かる。

表 1 全脳シミュレーションの計算規模見積もり

リアルタイムシミュレーション必要FLOPS	詳細なモデルを用いたヒトの全脳規模の神経回路シミュレーション	カイクガ全脳の神経回路のリアルタイムシミュレーション
細胞	$3 \times 10^{21}$	$7.2 \times 10^{16}$
シナプス	$5 \times 10^{19}$	$5 \times 10^{13}$
可塑性	$6.5 \times 10^{17}$	$6.5 \times 10^{10}$

出典：加沢他(2015 p.92)をもとに筆者作成

## 2 ムーアの法則

では、この計算性能が実現するのはいつになるのだろうか。

コンピュータの性能の発展についての将来予測として、ムーアの法則が挙げられる。ムーアの法則とは、コンピュータの 1 つの半導体集積回路<sup>14</sup>上のトランジスタ<sup>15</sup>の数は 1 年半ごとに 2 倍になるという経験則である。1 つの半導体集積回路上のトランジスタの数が増えることはコンピュータの高速化・小型化をもたらす(元橋一之 2009 p.2)。

ムーアの法則によると、 $n$ 年後の1つの半導体集積回路上のトランジスタの数の倍率は $2^{n/1.5}$ (倍)で表される。

従って、コンピュータの高速化に関わる1つの半導体集積回路上のトランジスタの数は10年後に約100倍、20年後には約10000倍と急激に伸びていくと予想される。これに伴い、計算性能も近い将来ヒトの全脳シミュレーションが可能になるまで発展すると期待される。

但し、最近伸びが鈍化しており、2年で2倍と言われている。しかしながら、複数の計算ノードで同時に計算を実行する「並列化」という方法によって今後もコンピュータの計算速度は指数関数的に進歩していくと考えられている(加沢他 2015 p.91)。

### 3 今後のスーパーコンピュータの性能の予測

ムーアの法則に従い、世界で最高性能を誇るスーパーコンピュータの性能についても、長年指数関数的に伸びてきた。そのようなスーパーコンピュータの性能の推移を表す片対数グラフを図1<sup>16,17</sup>に示す。

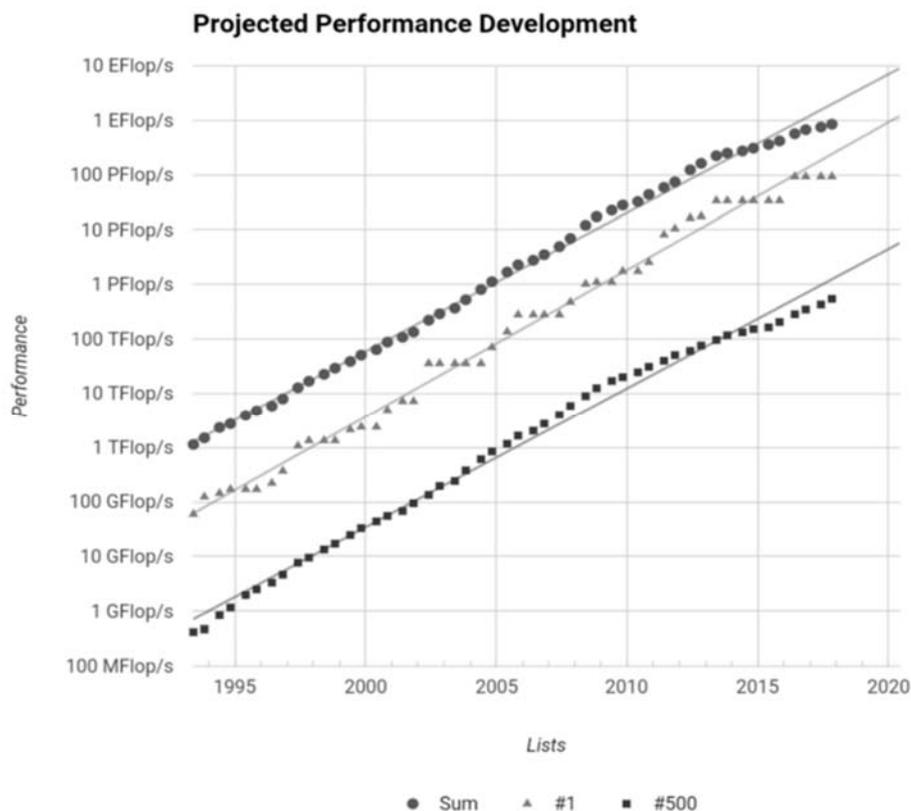


図1 スーパーコンピュータの性能の推移. グラフは下から、計算性能が500位の計算性能、計算性能が1位の計算性能、計算性能が1位～500位の計算性能の総和を示す.

出典: TOP500 “Performance Development”

(<https://www.top500.org/statistics/perfdevel/>)

この近似直線によって、未来のスーパーコンピュータの性能の予測を試みる。

まず、図1より、現在世界で最高性能を誇るスーパーコンピュータの計算性能は、すでに

カイコガの脳のリアルタイムシミュレーションに必要な計算性能である約  $7 \times 10^{16}$ FLOPS を上回っていることが分かる。さらに、並列化によってスーパーコンピュータの計算性能がこの近似直線通りに高くなっていくなれば、2032 年頃にはヒトの脳のリアルタイムシミュレーションに必要な計算量である約  $3 \times 10^{21}$ FLOPS を上回るスーパーコンピュータが開発されているであろう。

しかし、本当に並列化によるスーパーコンピュータの性能向上はこの先も問題なく続いていくのだろうか。

#### IV 並列化による性能向上の障害

##### 1 並列化とその問題点

###### (1) 並列化とは

複数の計算ノードで計算を行うことを並列計算という。並列化によって多数の計算ノードが互いに通信しながらデータを並列に計算することで、大規模情報を高速に処理することができる。「京」も並列計算を行うことで高い計算性能を実現している。

なお、脳は多数のニューロンやシナプスを同時に働かせ、情報をやり取りすることによって機能している。その意味でヒトの脳も超並列化されたスーパーコンピュータであると見なすことができる。このことから、ヒトの全脳シミュレーションを並列化を用いて目指すことは理にかなっていると言える。

###### (2) アムダールの法則

並列化によってどの程度計算性能が高くなるかについて考える際に、アムダールの法則が重要になる。アムダールの法則とは、計算プログラムの一部を並列化した時にコンピュータ全体でどの程度の性能の向上が期待できるかを表した法則である。

アムダールの法則による並列化の効果(倍)は、並列化可能部分の割合を  $P$ 、並列化するコンピュータの数を  $N$  とすると以下の式 1 で表される。

$$\frac{1}{(1-P)+P/N} \quad (\text{倍})$$

式 1 アムダールの法則

では、具体的に「京」をアムダールの法則に当てはめて考える。「京」の全計算ノードは前述したとおり 82944 個であるため、 $N=82944$  として  $P$  の値を変動させてみる。

仮に全計算ノードの 99.9 パーセントを並列化できたとすると、 $P=0.999$  となる。これらを式 1 に代入すると、並列化の効果は約 1000(倍)となる。この値は一見すると大きい数字に思われるだろう。しかしこれは、直列で残ってしまう部分で行う計算速度が変わらないことから、どれだけ多くの計算ノードを追加したとしても、計算速度が約 1000 倍以上速くならないことを表している。

以下に  $P$  と  $N$  の関係をグラフで表した図 2<sup>18,19</sup> を示す。

$$S = \frac{1}{(1 - P) + \frac{P}{N}}$$

S : 高速化率  
P : 並列化率  
N : プロセッサ数

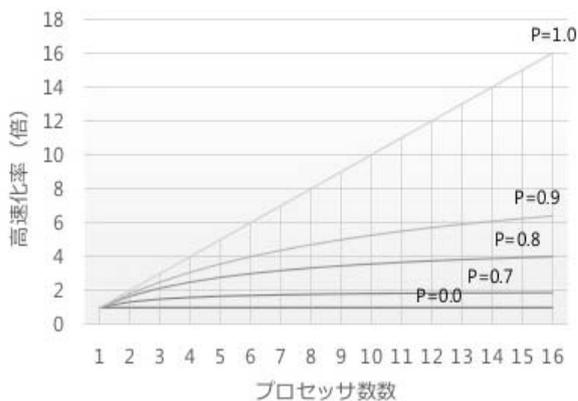


図 2 アムダールの法則

出典: 福島慶繁「名古屋工業大学 SSSSI2014 チュートリアル講演用資料」

(<https://www.slideshare.net/FukushimaNorishige/ssii-33751285>)

図 2 から、 $P$  が極めて 1 に近い値でなければ  $N$  がどれ程大きくてもコンピュータの計算速度が一定以上は上がらないことが分かる。

しかし、コンピュータには、どうしても逐次的に処理しなければならない部分や通信に関わる部分などが存在してしまう(宮本他 2015 p.634)。そのため、大規模並列計算においては、いかに  $P$  の値を 1 に近づけるかが重要となり、単純にコンピュータの数を増やすだけではヒトの全脳シミュレーションを実現するほどの計算性能を得ることは難しい。

## 2 量子コンピュータによる問題の解消

第 II 節で述べた、カイコガの神経回路において 786752 個の細胞を実際の時間の約 86 倍の時間をかけてシミュレーションした実験では、並列化可能部分の割合  $P=0.99999895$  を達成している(宮本他 2015 p.635)。しかし、逐次的に処理しなければならない部分を 0 にすることはできないため、少なくとも従来の方法では  $P$  の値を 1 に近づけるには限界がある。そのため、1 つの計算処理を複数の計算ノードで処理できる割合である「並列度」を任意の値にできる量子コンピュータ(西野哲朗 1995 p.339)について考える。

### (1) 量子コンピュータとは

量子コンピュータとは、並列度を任意の値にできるコンピュータであり、これを用いることで今まででは実現できなかった規模の並列計算が可能となる。そして、既に小規模の量子コンピュータが開発されている。

現在用いられている量子コンピュータでないコンピュータは、計算の最小単位として「ビット」を用いている。ビットは 0 か 1 のどちらかの値しかとらないが、ビットを並べることで 2 進数として全ての数を 0 と 1 で表現することができる。

一方、量子コンピュータは、計算の最小単位として 0 と 1 の 2 つの値をとれる「量子ビット」を用いる。量子ビットには 0 か 1 の 2 つの状態があるが、一つの量子ビットが一度に 2

つの状態をとることができる。これを重ね合わせ状態といい、人間によって観測されない限り量子ビットは0と1の両方の値であると考えられる。

従って、例えば従来のビット4つである数字を表そうとしたとき、0から15までの数字の内ある一つの数字しか表せないが、量子ビット4つを用いると0から15までの数字全てを表せることになる。

## (2) 量子コンピュータでヒトの全脳シミュレーションを行う

脳は完全に並列化されているわけではないが、量子コンピュータは並列度を任意に変更することができる。そのため、量子コンピュータを用いれば全脳シミュレーションを行うことが容易になるだろう。さらに、量子コンピュータを用いることによって、リアルタイムでのヒトの全脳シミュレーションを実現するにあたって足りていなかった計算性能を容易に向上させることもできるだろう。これらのことから、量子コンピュータが完全に実用化されればリアルタイムでのヒトの全脳シミュレーションを実現することができると考えられる。

## V ヒトの全脳シミュレーションの実現はどのようなことを可能にするか

では、ヒトの全脳シミュレーションの実現は人類にどのような利益をもたらすのだろうか。全脳シミュレーションによって実現されるのは、実際の脳では困難な、脳の働きの可視化である。これによって、未だ解明されていない脳機能の理解に繋がるだろう。例えば、認知症・パーキンソン病を始めとした脳疾患の原因や治療法といった様々な知見を得られると思われる。また、我々の意識がどのように生じるか、といった謎も解けるかもしれない。さらに、これらから発展して汎用人工知能の開発に繋がれば、さらなる人類の発展を可能にするはずだ。

しかし、汎用人工知能の発展形である、人類を超越する知能を持つ「超知能」の誕生や、特定の間人そのままの全脳シミュレーションに等しい、人間の意識をコンピュータにアップロードするという「マインド・アップローディング」といったことが可能になると、これまで人類が直面してこなかった予想外の問題が発生する可能性がある。

このように、ヒトの全脳シミュレーションの実現には功罪の両面を見ることができるだろう。

## VI まとめ

本稿では、現在行われている全脳シミュレーションについての研究を挙げ、ヒトの全脳シミュレーションを実現させるには現在のスーパーコンピュータの計算性能では足りないことを示した。また、このままの発展速度でスーパーコンピュータの計算性能が向上していった際に、リアルタイムでのヒトの全脳シミュレーションがいつ実現するかを示した。次いで、スーパーコンピュータの性能の向上を妨げ得る問題と、その問題の解決策を挙げた。そして最後に、ヒトの全脳シミュレーションの実現が人類にどのような影響を与えるかを考察した。

しかし、スーパーコンピュータの性能の向上を妨げ得る問題の解決策として挙げた量子コンピュータについて、量子コンピュータの実現可能性や、量子コンピュータを用いることについての問題点まで考察することができなかつた。但し、脳を含む物理的演算装置は全て量子コンピュータで効率よく模倣することができるということが示されている(西野哲朗 1995 p.339)ため、量子コンピュータが実用化されれば理論上は量子コンピュータを用いてヒトの全脳シミュレーションを行うことは不可能ではないと考えられる。

ヒトの全脳シミュレーションの実現は科学技術の爆発的な進化である「シンギュラリティ」に直結するかもしれない。第V節に挙げたように、意識を持つロボットを作り出すことや、マインド・アップローディングによって人間は不老不死になるかもしれない。だが、シンギュラリティが来れば経済的貧困や地球環境問題といったありとあらゆる問題が解決するといった考え以外にも、人間よりも優れた知能を持つ機械によって人間は絶滅に追いやられるといった考えもある。もはやこれらの未来は我々の目前に迫っている。我々が持ち得る技術をどう使うか、その議論は今まさに行うべき課題であるだろう。

- 
- 1 神経細胞(ニューロン)がその接合部(シナプス)によって相互に結合している状態を指す。
  - 2 ある特定の作業に特化した人工知能である特化型人工知能に対して、様々な用途に柔軟に応用できる人工知能を指す。現存する人工知能は全て特化型人工知能である。
  - 3 ニューロンと呼ばれる神経細胞の結合の仕方をコンピュータで再現すること。既に 300 個程度のニューロンを持つ線虫のコネクトームが作られており、アメリカのプリンストン大学のセバスチャン・スンによる人間の脳のコネクトーム作成を目標とした研究にはグーグル社による支援がある。
  - 4 神経細胞を模擬する半導体チップ。IBM 社が進めているニューロモルフィック・チップ開発計画であるシナプス計画には、アメリカ国防総省から資金援助がある。
  - 5 ヨーロッパで 2013 年から行われている全脳シミュレーション計画「ヒューマン・ブレイン・プロジェクト」には EU から最大 10 億ユーロ(約 1200 億円)の予算が出ている。
  - 6 文部科学省所轄の独立行政法人である、日本で唯一の自然科学の総合研究所。
  - 7 ドイツの西側のユーリッヒという街にある研究所。スーパーコンピュータに関連した分野での研究が盛んで、2013 年当時でヨーロッパ最高速のコンピュータ「JUQUEEN」を保有していた。
  - 8 沖縄県国頭群恩納村に位置する大学院大学。沖縄において世界最高水準の科学技術に関する教育研究を行うことにより、沖縄の自立的発展と世界の科学技術の向上に寄与することを目的としている。
  - 9 文部科学省が推進する「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI) の構築」プログラムの一環として、理化学研究所と富士通が共同開発したコンピュータ。その名の通り 1 秒間に 1 京回の計算性能を持つ。
  - 10 コンピュータ内で実際に計算を行う部分。この計算ノードが多数接続されて巨大な 1 つのコンピュータとして機能している。
  - 11 表 1 出典：(加沢他 2015 p.92)、筆者作成
  - 12 ニューロン同士の接合部であるシナプスは、その伝達効率を変化させる。これを可塑性と呼び、学習や記憶のメカニズムであると考えられている。
  - 13 FLOPS、また Flop/s とはコンピュータの計算性能を示す指標である。1 秒間に何回計算(正確には浮動小数点演算)ができるかを示す。
  - 14 半導体チップの上に抵抗・コンデンサー・ダイオード・トランジスタといった部品を集め

---

て作られた電子回路。

- <sup>15</sup> トランジスタは僅かな電流を大きな電流に変える増幅器の役割をする部品である。また、スイッチとしての役割もある。
- <sup>16</sup> 図1 (TOP500 パフォーマンス・グラフ <https://www.top500.org/statistics/perfdevel/>) より引用
- <sup>17</sup> M,G,T,P,E はそれぞれメガ、ギガ、テラ、ペタ、エクサと読み、 $10^6, 10^9, 10^{12}, 10^{15}, 10^{18}$ を表す。
- <sup>18</sup> 図2(名古屋工業大学 福嶋 慶繁 SSSSII2014 のチュートリアル講演用資料 <https://www.slideshare.net/FukushimaNorishige/ssii-33751285>) より引用
- <sup>19</sup> プロセッサとは、実際に命令やデータを処理する部品である。計算ノードにはこのプロセッサが含まれている。

## 参考文献

- 甘利俊一 (2016) 『脳・心・人工知能：数理で謎を解き明かす』、講談社
- 石井信 (2015) 「スーパーコンピュータによる脳神経系シミュレーション」、『人工知能』、30(5)、pp.616-22
- 加沢知毅他 (2015) 「昆虫全脳シミュレーションへむけて—その構成技術と進展—」、『日本神経回路学会誌』、22(3)、pp.89-102
- 加藤公一 (2006) 「量子コンピュータを用いた数値積分計算について」
- 神崎亮平 (2005) 「昆虫の神経系と適応行動」、『日本ロボット学会誌』、23(1)、pp.27-31
- 神崎亮平 (2014) 『サイボーグ昆虫、フェロモンを追う』、岩波書店
- 北野勝則 (2015) 「脳のシミュレーションを始めるために」、『人工知能』、30(5)、pp.607-15
- セバスチャン・スン (青木薫訳) (2015) 『コネクトーム：脳の配線はどのように「わたし」をつくり出すのか』、草思社
- 竹内繁樹 (2005) 『量子コンピュータ：超並列計算のからくり』、講談社
- ダニエル・ヒリス (倉骨彰訳) (2000) 『思考する機械 コンピュータ』、草思社
- 西垣通 (2016) 『ビッグデータと人工知能：可能性と罠を見極める』、中公新書
- 西野哲朗 (1995) 「量子コンピュータ」、『情報処理』、36(4)、pp.337-40
- 前川喜平 (2008) 「高次機能—知能の発達」、『バイオメカニズム学会誌』、32(2)、pp.74-82
- 水波誠他 (1999) 「昆虫の嗅覚学習」、『電子科学研究』、7、pp.69-71
- 宮崎博行他 (2012) 「スーパーコンピュータ「京」の概要」、*FUJITSU*、63(3)、pp.237-46
- 宮本大輔他 (2015) 「昆虫嗅覚系全脳シミュレーションに向けて—スーパーコンピュータによる大規模脳シミュレーションの現在とその展望—」、『人工知能』、30(5)、pp.630-8
- 茂木健一郎・田谷文彦 (2003) 『脳とコンピュータはどう違うか：究極のコンピュータは

---

意識を持つか』、講談社

- 元橋一之 (2009) 「半導体イノベーションと経済成長：マクロレベル生産性におけるムーアの法則の重要性」、RIETI ディスカッションペーパー09-J-016、経済産業研究所
- 理化学研究所 (2013) 『「京 (けい)」を使い 10 兆個の結合の神経回路のシミュレーションに成功ー世界最大の脳神経シミュレーションー』、  
<[http://www.riken.jp/pr/topics/2013/20130802\\_2/](http://www.riken.jp/pr/topics/2013/20130802_2/)> (2017.11.13 閲覧)
- Deutsch, D. (1985) “Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer”, *Proceedings of the Royal Society of London, A* 400, pp. 97-117
- Giurfa, M. (2001) “The concepts of ‘sameness’ and ‘difference’ in an insect ”, *Nature*, 410(6831), pp.930-3
- Herculano-Houzel, S. (2009) “The Human Brain in Numbers: A Linearly Scaled-up Primate Brain”, *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol.3, Article 31, doi: 10.3389/neuro.09.031.2009 (2018.01.15 閲覧)
- Miyamoto, D. *et al.* (2012) “Neural Circuit Simulation of Hodgkin-Huxley Type Neurons Toward Peta Scale Computers”, *High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SCC), 2012 SC Companion*, p.1541
- Stevenson, P.A. *et al.* (2000) “The fight and flight responses of crickets depleted of biogenic amines”, *Journal of Neurobiology*, 43(2), pp.107-20