2019年度理工学図書館前期講習会

新しいコンピューティングの時代
～脳型コンピュータが変える世界～

工学研究科 精密科学・応用物理学専攻

M2 岡田 将

※著作権等の関係でスライド内容が一部発表時と異なります。

目次

◆コンピュータの性能の限界？

◆様々な新型コンピュータ

◆脳型コンピュータの研究・応用

◆まとめ

目次

◆コンピュータの性能の限界？

◆様々な新型コンピュータ

◆脳型コンピュータの研究・応用

◆まとめ

コンピュータの発展

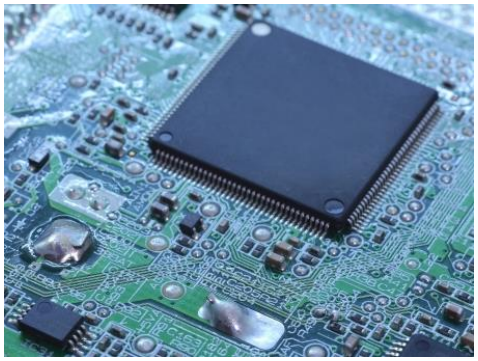
コンピュータの性能向上に伴って色々なことができるようになった！

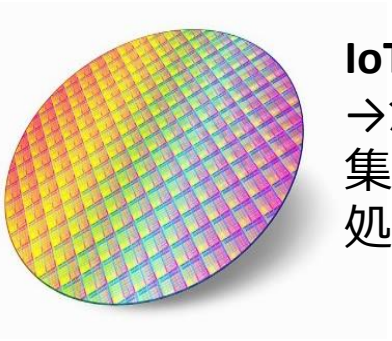
スマートフォン

対話用ロボット

囲碁用AI

集積回路の性能向上＝PCの性能向上‼





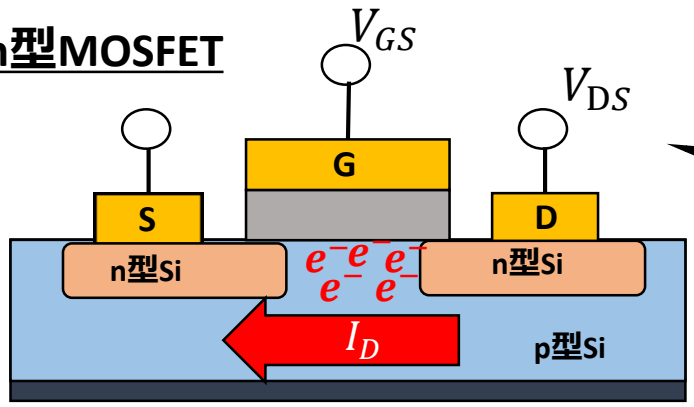
IoTの時代が到来する！
→沢山のセンサーから情報を集めて、膨大な量の情報を処理する時代

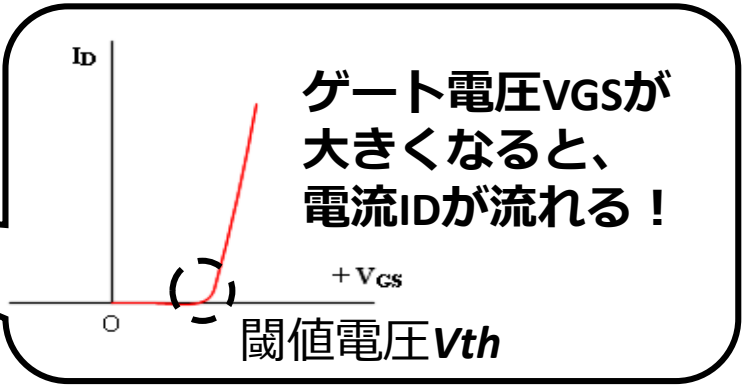
CPUの性能向上(＝電気回路の集積化)がカギになっている！

トランジスタとCPU

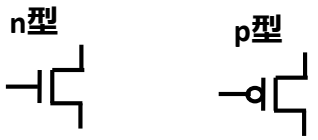
トランジスタ……3端子からなるスイッチング素子。ドレイン(D)ーソース(S)間に流れる電流をゲート(G)電圧で制御できる。

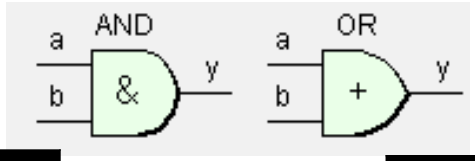
n型MOSFET





MOSFETにはn型、p型の二種類存在する……





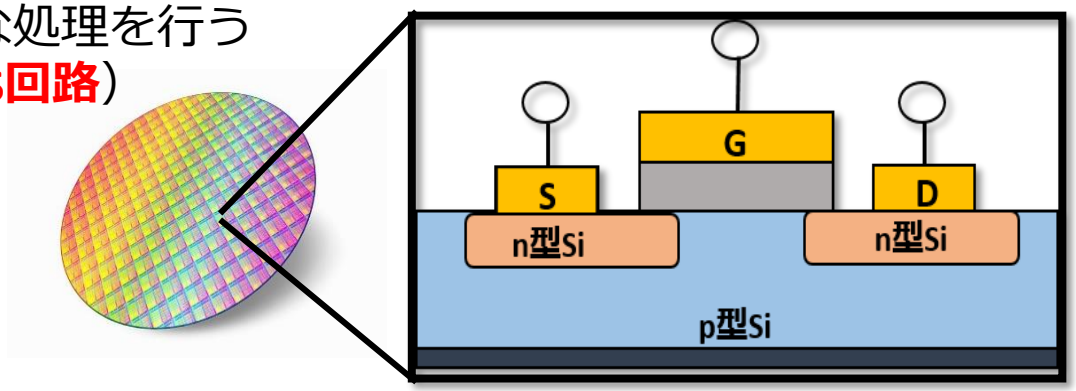
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

n,p型FETを組み合わせることで様々な処理を行う
デジタル論理回路が作製可能（**CMOS回路**）

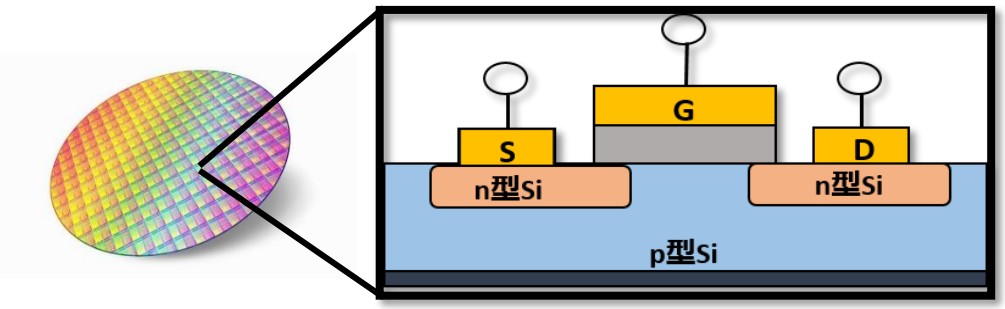
CMOS回路はシリコンプロセスによって、ウエハ上に一括で大量に作製することができる

→集積回路,CPUへ！！



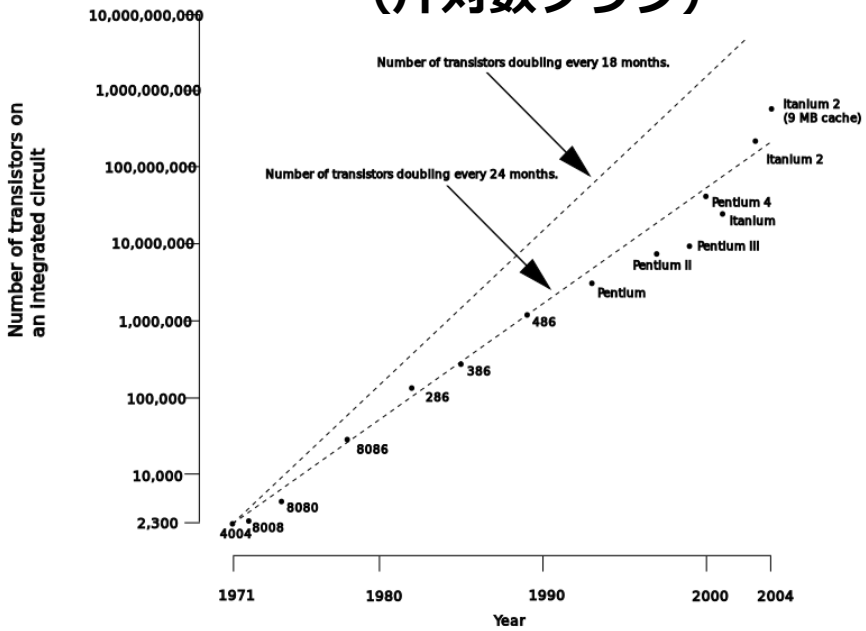
集積回路とムーアの法則

ムーアの法則……集積回路のトランジスタ数は年数に対して指数関数的に増えていく



集積化するほどトランジスタの性能も上がる！(スケーリング則)

Wikipedia "moore's law"（片対数グラフ）



トランジスタの大きさ

小 ◀ ▶ **大**

消費電力

小 ◀ ▶ **大**

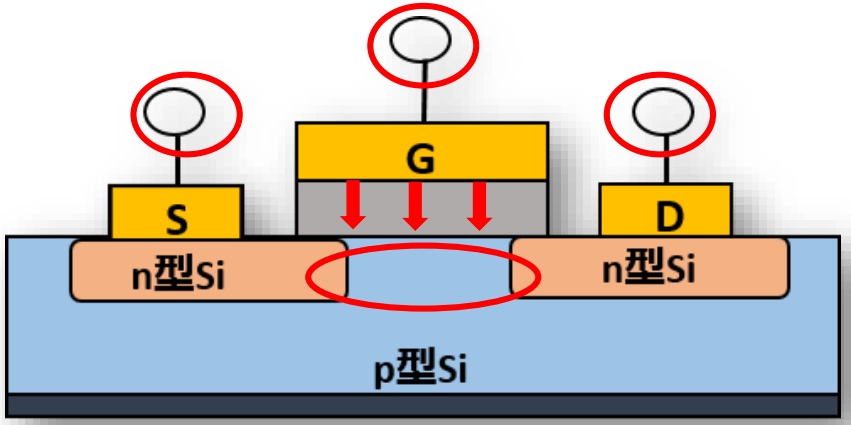
動作速度

大 ◀ ▶ 小

トランジスタを小さくすることでCPUは性能を上げてきた！

集積化の限界

しかしながら、トランジスタの集積化には終わりが近づいている……



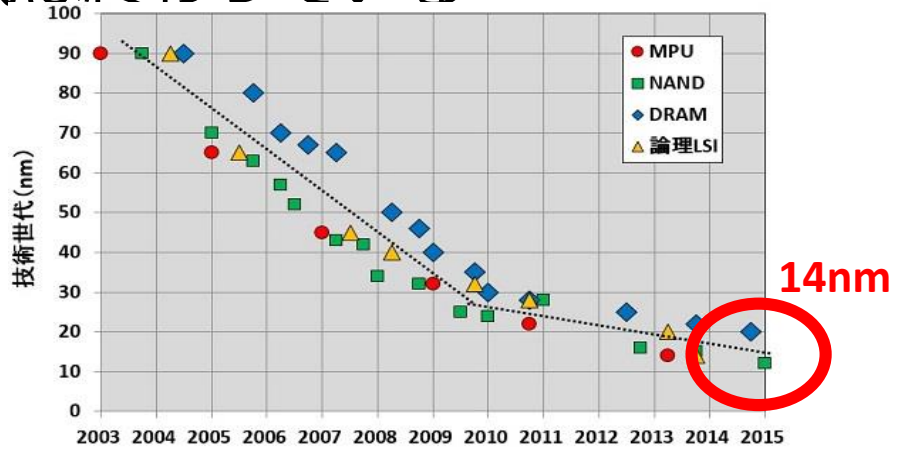
トランジスタが小さくなると…

- **ゲートから電流が漏れる（トンネル効果）**
- **貫通電流の増加（短チャネル効果）**
- **配線を通る電流容量が小さくなる（熱効果）**

小型化=高性能化の時代は終わっている

今現在のトランジスタの微細化限界は
14nm→7nmに突入している

原子一層の厚みは~nmオーダー
→これ以上小さくできない！



https://biz-journal.jp/2015/06/post_10470_2.html
出典：日経エレクトロニクス2015年4月号p30 図30

限界を超えるために，新たな手を打つ必要がある！

目次

◆コンピュータの性能の限界？

◆様々な新型コンピュータ

◆脳型コンピュータの研究・応用

◆まとめ

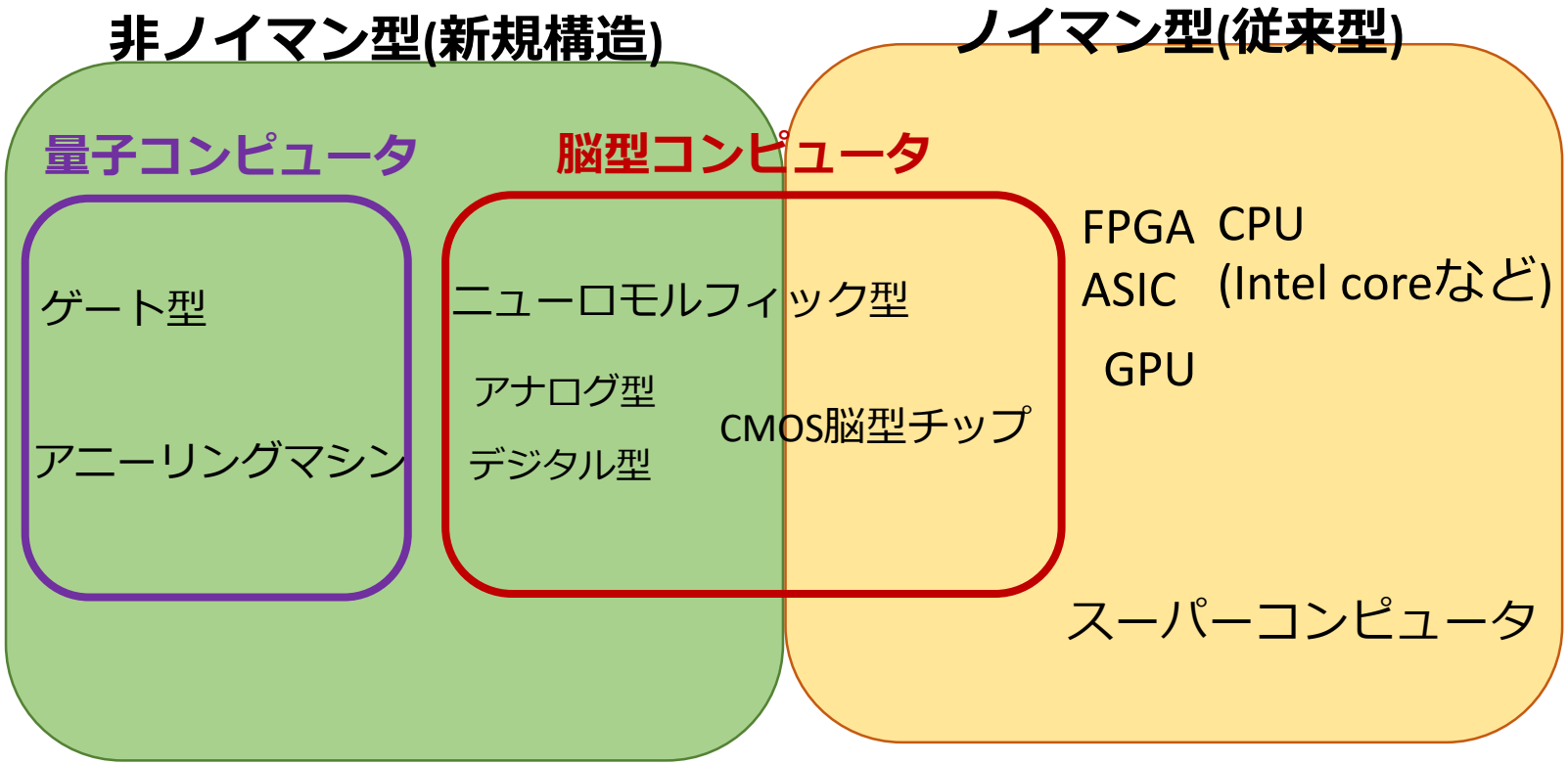
どうやってCPU限界を克服する？ 5

◆ トランジスタやメモリの材料・構造を変える‼
（基本的な仕組みは同じだけど、より高性能な材料を使う）

（例）Ge, Ⅲ-Ⅴ族FET
（例）ReRAM, PCRAM

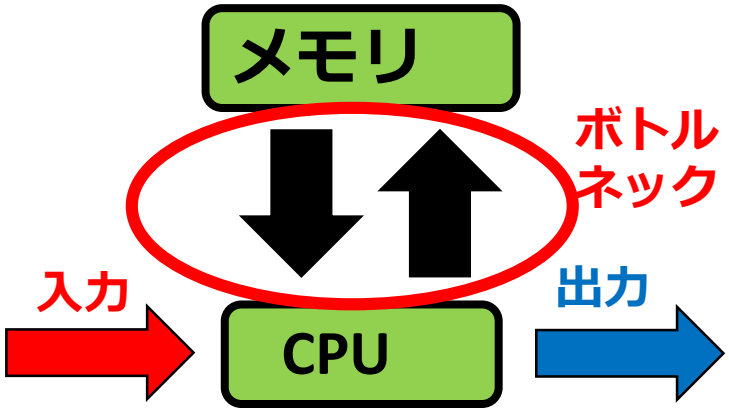
◆ 新しいコンピュータを開発する！

新規・従来型コンピュータの分類



難しい計算『だけ』外注する

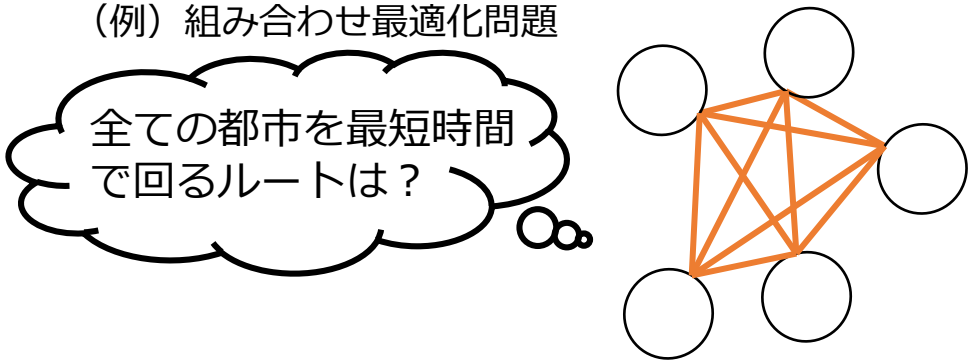
従来のコンピュータ内のCPUは**逐次的**に情報処理を行っている……



従来のコンピュータが苦手な問題

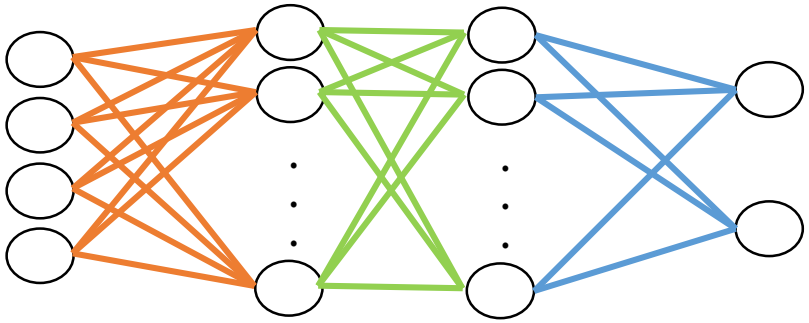
・指数関数的に計算量が増える問題

（例）組み合わせ最適化問題



・大規模な並列計算を必要とする問題

（例）ニューラルネットワーク



強いメリット！

・様々な命令に対応可能（汎用性）
・ソフトウェア環境が充実
・デジタル計算だから精度が高い

現存のコンピュータ全てを置き換える必要はない！

コンピュータが苦手な情報処理に特化したハードウェアを作ればいい！

ゲート型量子コンピュータ

電子や光子を量子ビットとして活用して『０』と『１』の重ね合わせを作り、一度に計算を行える

量子ビット

$$|\varphi>=\alpha|0>+\beta|1>$$

$|\alpha|^2+|\beta|^2=1$ (どちらも複素数)

0と1が一定確率で混在

(例)2ビットがある時.....

古典ビット

００　０１　１０　１１　のどれか

量子ビット

$\alpha|00>+\beta|11>$
$+\gamma|01>+\delta|10>$

? ?

観測するまで0か1かわからない

量子ビットが増えるたびに2の階乗オーダーで並列計算できる数が増えていく!

問題点

・量子状態を維持するのが難しい
→多量子ビットの制御困難
・回路実装が大規模(極低温)
・正確な計算結果をどう得るのか？

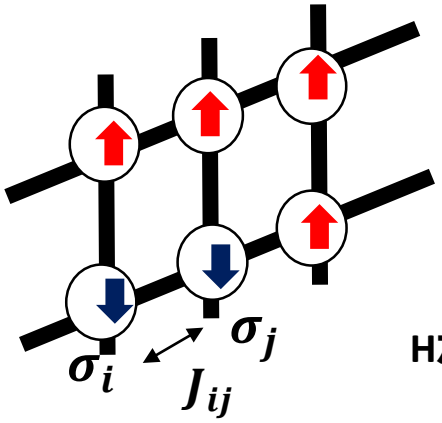
(例)NTTレポートより
超伝導を利用した量子ビット図[1]

[1]http://www.ntt.co.jp/journal/0401/files/jn200401042.pdf

実現ができれば非常に強力なコンピュータ

量子アニーリングマシン

量子アニーリングマシン…… 特定の問題（組み合わせ最適化問題）に特化した量子コンピュータ。日本人が提唱！(**1998年 西森秀稔博士**)



量子ビットが並んだ系のハミルトニアンHは、

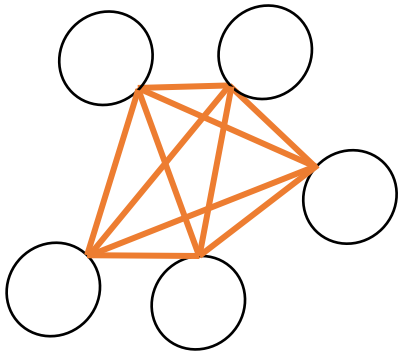
$$H = \sum_{i \neq j} J_{ij}\,\sigma_i \sigma_j + \sum_i h_i \sigma_i$$

＋外部磁場

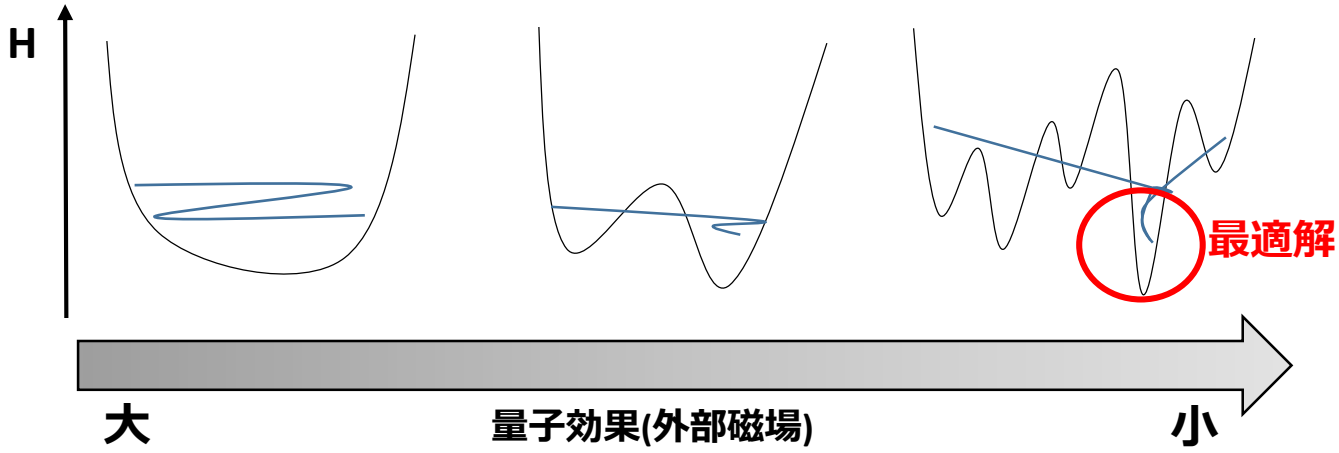
スピン同士の相互作用　　**1量子のエネルギー**

Hが最小になるようなスピンの組み合わせが最適化問題の答えになる！

対応



量子アニーリング→外部から磁場を加え、徐々に小さくしていくことにより最小Hを探索



計算に時間がかかる最適化問題を肩代わり！

量子コンピュータの動向

ゲート型、イジング型それぞれの量子コンピュータが各国で研究・開発されている

ゲート型量子コンピュータ

IBM(20ビット→50ビット)
Google(72ビット)
Intel(49ビット)

IBM Q(20量子ビット)
→クラウドサービス

IBM社ホームページより
https://www.research.ibm.com/ibm-q/network/overview/

米国の大手IT・半導体企業が開発。(予算が莫大)
現状商用化しているもので20ビット、開発目標は~100ビット。

量子アニーリングマシン（イジング型）

D-wave(超伝導・商用化)
NTT(光イジングマシン)
日立製作所(CMOS)
富士通(デジタルアニーラ)

2000Qシリーズ
2048量子ビット(商用化)

Dwave社(カナダ)

D-wave社ホームページより
http://dwavejapan.com/system/

カナダのD-waveが先導。
日本企業も光やデジタル回路を用いたイジングマシンを開発中。
2000ビットでも商用化！

- **実現すれば非常に強力であり、大規模な装置を各国で開発中**
- **装置としての規模が大きく、極低温に冷やすなどの措置が必要**
- **既存のCPUとうまく併用していく方向性**

目次

◆コンピュータの性能の限界？

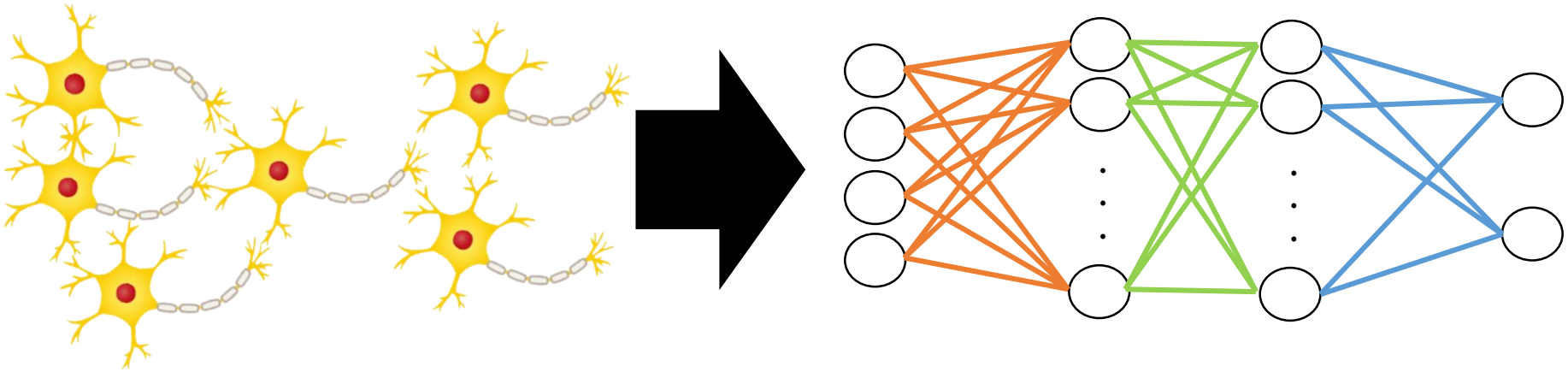
◆様々な新型コンピュータ

◆脳型コンピュータの研究・応用

◆まとめ

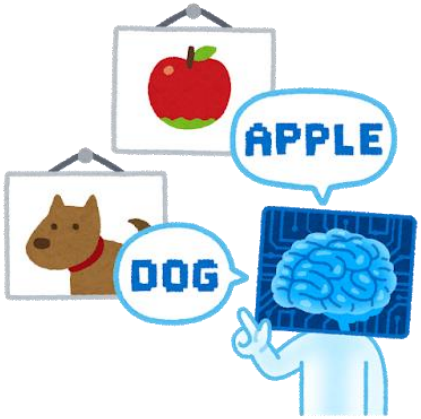
脳を模倣した情報処理技術　１０

人間の脳内では積和演算を通じて並列的な情報処理を行っている



この脳の機能を計算モデル化したものを**ニューラルネットワーク**と呼ぶ！

自動運転



画像認識

現在様々な分野でニューラルネットワークは使われている！

が、大規模な並列演算のため現状のコンピュータでは計算効率に限界

脳型コンピュータはなぜ必要か？11

現状のコンピュータでは、人間の脳の**情報処理効率**には程遠い……

（例）囲碁での対決

AlphaGo(人工知能)

スーパーコンピュータ
CPU　1202個
GPU　176個

人間の棋士

脳　1個

消費電力は

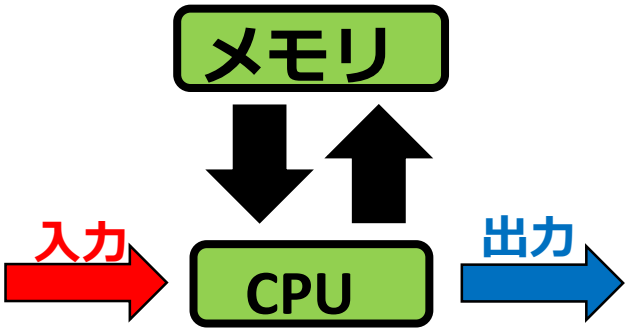
250,000W

およそ1/10000！

20W

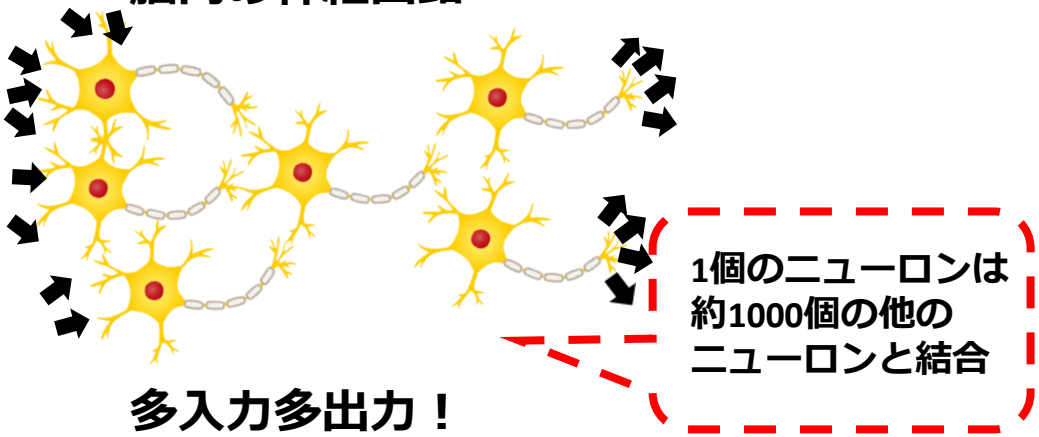
同じタスクをしているはずなのに、なぜここまで消費電力がちがうのか？

コンピュータ



基本的には1対1

脳内の神経回路



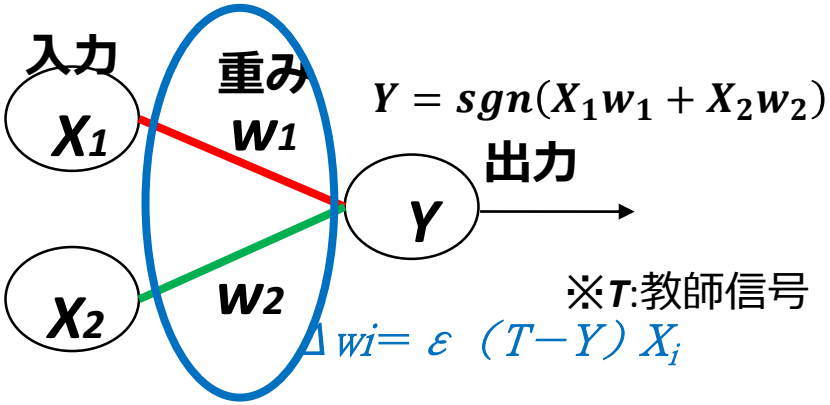
多入力多出力！

新しい構造・材料を使った『脳型コンピュータ』が必要！

NNの抽象度

ニューラルネットワークには様々な抽象度・機能のモデルが存在する（これ以外にもあり）

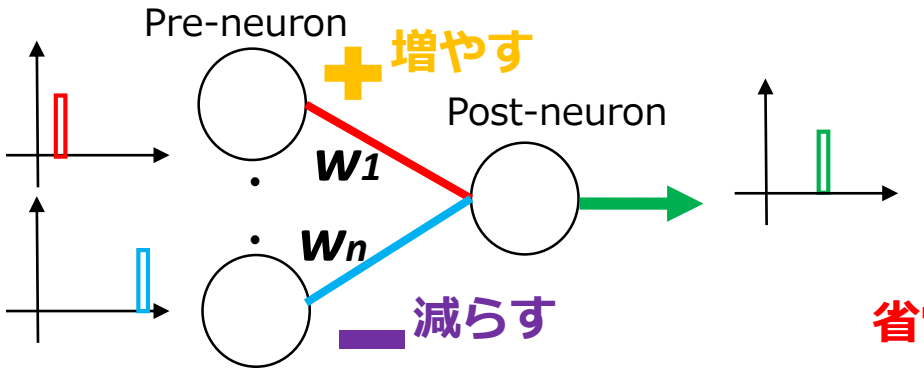
ニューラルネットワーク



入力xと重みwの積和から出力y
を計算
お手本とyを比較して間違っていたら
wを変えて学習

重みを変化させることで学習！

スパイキングニューラルネットワーク



前後のパルス出力の時間
関係を用いて学習・演算

省電力・高速に演算可能！

脳演算シミュレーター（基礎研究）

より複雑な脳機能についてスパコン等でシミュレーションを行い、
その結果を理論としてフィードバック

簡単

複雑

脳型コンピュータの開発動向　１３

◆既存のスパコンやCMOSテクノロジーを追及していく路線
(従来型の改良)

◆CMOS回路による高速動作・省電力の新規構造脳型ハードウェア

◆新しい材料・物理現象に着目した脳型ハードウェア

パルスを利用した省電力脳型回路 １４

脳構造をCMOS回路上で模倣したチップで省電力かつ高速演算処理が可能

TrueNorth(IBM)

コア数4056

1コアごとに、
ニューロン→256個
シナプス結合→1ニューロンごとに256個
構造に関しては[2]を参照

[2]P. Merolla et al., Science, vol.345 No.6197, p668-673(2014)

Loihi(Intel)

コア数128

1コアごとに、
ニューロン→1024個
シナプス→1ニューロンごとに1024個
構造に関しては[3]を参照

[3]Make Davies et al, IEEE Micro, vol.38 p82-99(2018)

様々なタスクのCPUとの性能比較 [2]

		確率ネットワーク	画像フィルター	物体検知
TrueNorth	time(s) energy(J)	10 0.720	10 0.600	10 0.630
CPU	time(s) energy(J)	1,290 127,000	2,012 182,000	1,025 82,000

画像再構成問題の演算効率 [3]

ディレクトリ数	400	1,700	32,256
消費エネルギー	2.58倍	8.08倍	48.74倍
演算速度	0.27倍	2.76倍	118.18倍
EDP(トータル効率)	0.7倍	22.33倍	5,760倍

エネルギー効率約6000倍！

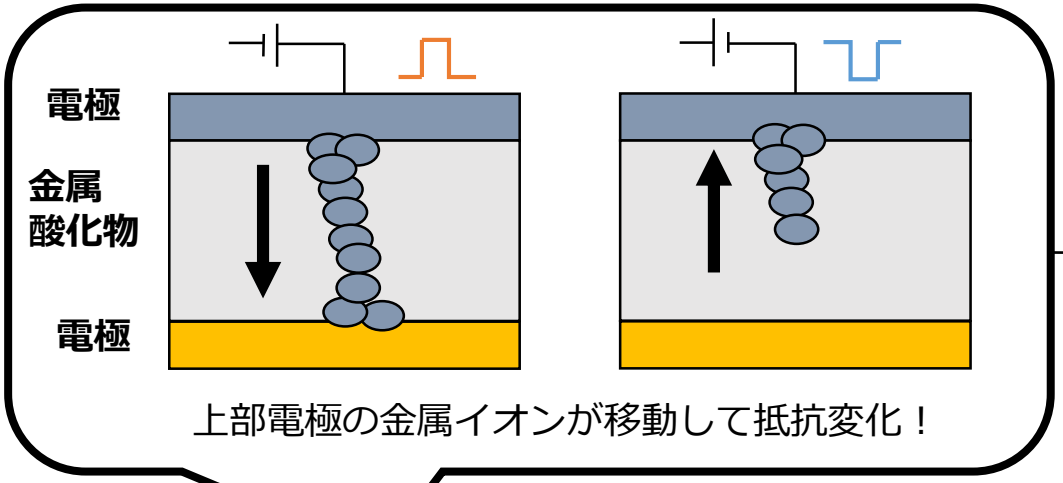
既存のCPUと比べて非常に明らかに演算効率が高い！

既存のCPUと組み合わせて高速化！クラウドでもエッジでも利用可能！
企業ベースで開発・商用化が進められている！

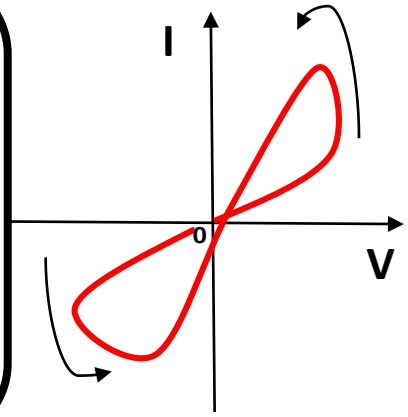
メモリスタによるNN専用チップ１５

計算をより効率良くするため、金属酸化物を用いた回路によるハードウェアが研究されている

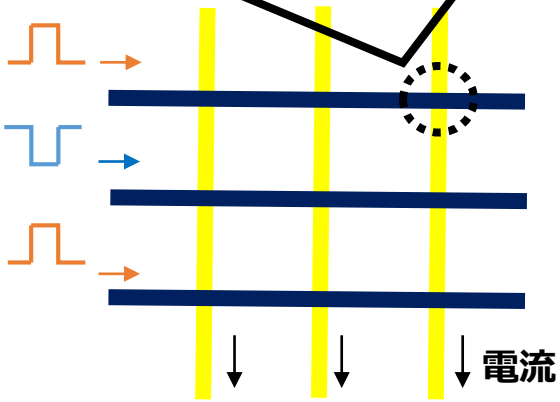
メモリスタ—I-V曲線がヒステリシスを描くような酸化物スイッチを用いた２端子不揮発性メモリ



上部電極の金属イオンが移動して抵抗変化！



- ✓ **不揮発性**
- ✓ **一括作製可能**
- ✓ **高集積化**
- ✓ **シリコンプロセスとの相性がいい**

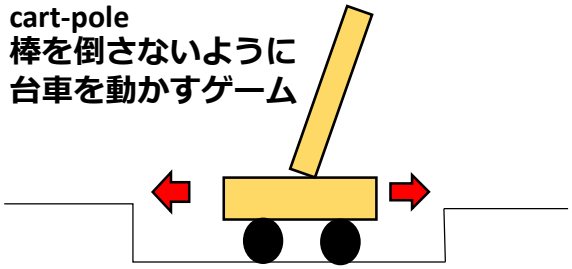


クロスバー状に集積すれば大規模な並列計算もオームの法則で一瞬！

メモリスタ回路によるNNハードウェアの学習例

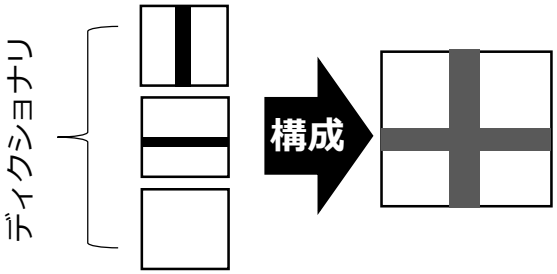
強化学習によるゲームの行動最適化[4]
(Deep Q-network)

cart-pole
棒を倒さないように
台車を動かすゲーム



[4] Zhongrui Wanget al., ***Nature electronics*** 2(2019) 115-124

画像圧縮・再構成[5]
(スパースコーディング)



[5]Patrick M. Sheridan et al. ***Nature Nanotech***, 12, 784-789 (2017)

その他の新材料による脳型素子１６

メモリスタの他にも様々な材料による新しい素子・デバイスが提案・開発されている

相変化メモリ(IBM)

結晶—非晶質相変化を利用！[6]

[6]T. Tuma et al. ***nature nanotechnology***, **11** 693-699(2016)

光集積回路(MIT)

光導波路の透過率変化を利用！[7]

[7]Yichen shen et al.
nature photonics 11, 441-446 (2017)

磁性体スイッチ(東北大)

磁性体のホール効果を利用！[8]

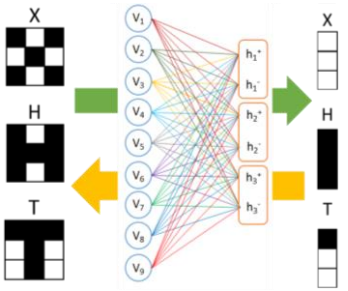
[8]William A. Borders et al.
Applied Physics Express 10, 013007 (2017)

有機材料

導電性高分子内の酸化還元反応を利用！
フレキシブルデバイス[9]

[9]Yoeri van de Burget et al. ***nature materials***, 16 414-418(2017)

導電性高分子ワイヤーの電解重合
(私の研究テーマ)



- **物理現象によるアナログ演算であるため非常に高速かつ省電力**
- **次々に新材料によるデバイスの提案がされている**
- **基礎研究段階のものが多い**

(提案だけして単一素子特性計測・シミュレーションだけで終わっている論文が多い)

本発表のまとめ

◆従来型CPUの性能の限界を超えるため、様々な新構造・材料のコンピュータ・演算素子が研究開発されている

◆人間の脳を模倣したハードウェアは演算速度・エネルギー効率がとても良いしCMOSとの相性もいい

◆新型コンピュータは大体何かの目的に特化したものなので、既存のCPUとうまく組み合わせることが重要！

本講習会の参考文献

書籍(理工学図書館に所蔵しているものは赤)

・人工知能 vol.33 No.5(2018)
→『自然界に見出す数物構造を利用した知的情報処理』という特集は必見。

・メカ屋のための脳科学入門(高橋宏和著、日刊工業新聞社)
→機械工学的な観点から脳の機能について説明した本。生物系以外でも読みやすい。

・量子コンピュータ入門(宮野健次郎/古澤明著、日本評論社)
→ゲート型量子コンピュータの原理を詳しく知りたい人は是非。

・IoTを支える技術(菊池正典著、SBクリエイティブ)
→IoTに必要な技術全般の紹介の中で、CMOSや脳型ハードウェアについても一通り説明されている。

Web上でダウンロード可能

・TSC foresight vol.30（https://www.nedo.go.jp/content/100884652.pdf）
→NEDOのレポート。新型コンピュータ・ハードウェアの全体像をつかみやすい。

・『ニューロモルフィック工学・脳型機械学習ハードウェアの行方』
日本神経回路学会誌. 2015 22(4):162-169
→脳型コンピュータ・ハードウェアについてまとめられた数少ない日本語論文。

このスライドは、
以下の大阪大学附属図書館webサイト
「ラーニング・サポーターによる講習会のテキスト」のページ
でも公開されています。

https://www.library.osaka-u.ac.jp/ta_lectures/