

スクエアfreeセミナー
2025年 4月24日 (木)

量子コンピュータ と 生成AI の 基本原理 は 同じ !

— 技術革新のスピードに追いつけない時代, コレを知れば 楽に学べる —



MCPC モバイルコンピューティング推進コンソーシアム 上席顧問 AIエバンジェリスト
グローバルベンチャー協会 理事 兼DX部会長

徳島大学 工学部 非常勤講師

株式会社コガク 指導講師

国会高専人会 副会長

DXビジネス変革コミュニティ 共同代表

DX専門家, 企業教育家 竹井 俊文

takei_t_easy13@outlook.jp

プロフィール：竹井 俊文（たけい としふみ）

- 1980 徳島大学大学院 修士課程修了(電気工学科: **ニューラルネット研究**)
(日立製作所 東原敏昭会長, ノーベル物理学賞 中村修二博士は1年先輩)
- 1980 **NEC** 日本電気株式会社 入社
(デジタル交換機ソフトウェア開発, **ネットワーク**技術者教育, 講師)
- 2009 IP電話普及推進センタ エバンジェリスト

定年退職後 … **DX(AI・生成AI・5G・IoT)専門家として活動中**

- 2014 MCPC モバイルコンピューティング推進コンソーシアム 事務局長代理
- 2018 MCPC 上席顧問 兼 **AI**エバンジェリスト
- 2019 GVA グローバルベンチャー協会 理事 兼 **DX**部会長
- 2020 国土舘大学 経営学部 非常勤講師 (データと**AI** 戦略的活用講座)
- 2021 徳島大学 理工学部 非常勤講師 (**生体工学**特論)
- 2021 DXビジネス変革コミュニティ 共同代表
- 2022 株式会社コガク指導講師 (**DX, AI, 5G, 生成AI**)
- 2023 国会高専人会 副会長
- 2024 徳島大学 地域カーボンニュートラルプロジェクト参画 (**DX**専門家)
- 2025 同 人と地域共創センター リスキリング講師 (**DX**講座)



次世代光フォーラム2024
講演 徳島大学 にて

書籍・新聞

- 『ゼロから学ぶDX入門講座』（コガク/とおとうみ出版）
- 『ゼロから学ぶ5G入門講座』（コガク/とおとうみ出版）
- 『ゼロから学ぶ生成AI入門講座』（コガク eラーニング）
- 『生成AIにダマされないための統計学の基礎』（同上）
- 『数式・Pythonなしでわかるディープラーニング』（コガク）
- 『ビジネスパーソンのための5G入門講座』（コガク）
- 『IP電話標準テキスト』（リックテレコム）
- 『モバイル基礎テキスト』（共著 リックテレコム）
- 『モバイルシステム技術テキスト/エキスパート編』（同上）

電波新聞／電波新聞デジタル 連載「5Gがくる」

日刊工業新聞雑誌『The Robot』「ディープラーニングを実務で…」

日刊工業新聞雑誌『型技術』連載「ノーマル時代のDXを考える」

主な講演・メディア出演

2014 中国SIOT学会講演『日本IoT応用発展』

2019 電子情報通信学会講演『AI技術の概要と限界, それを踏まえた産業応用』

2019 情報処理学会ソフトウェアアジャパン講演『市場にみるIoT、AIの実践』

2023 徳島商工会議所講演『ゼロから学ぶDXと生成AI』

2023 NHK総合テレビ『四国らしんばん』「新時代はローカル5G」ゲスト出演

2024 次世代光フォーラム2024 招待講演『次世代光が照らすDXビジネス変革の明るい展望』

2024 機械金属工業会講演『DXって何？ 生成AIって何？ 機械金属と関係あるの？』



NHK放送局にて

「ゼロから学ぶDX入門講座」

(<https://www.youtube.com/watch?v=vowusPn6Bys>)

DX入門書の決定版！！ (株)コガク※編

※導入企業**5万社**以上／のべ受講者数**50万人**
企業向けエンジニア育成のパイオニア！！

- 1章 **DX** の背景
- 2章 **DX** とは？
- 3章 デジタル技術 を活用する
- 4章 **ビッグデータ** を活用する
- 5章 **IoT, AI, 5G** の役割
- 6章 **ビジネス** 変革

4. ビッグデータを活用する
AIは何をやってくれるの？

データに潜む有意情報

相関関係 (Aが変化⇒Bも変化)

変色、異音⇒機械の異常
OOの文字⇒迷惑メール
OOを検索する人⇒△△を購入する人
顔の特徴(目, 鼻, 口など)⇒猫の顔
文字の特徴(ヘン, ハネなど)⇒文字O

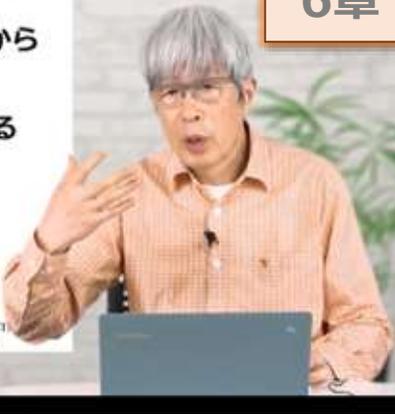


AIは、ビッグデータから「相関関係」を発見・学習してくれる

代表例: **ディープラーニング**



(出典) Googleの猫: Using large-scale brain sim for machine learning and A.I. June 26, 2012

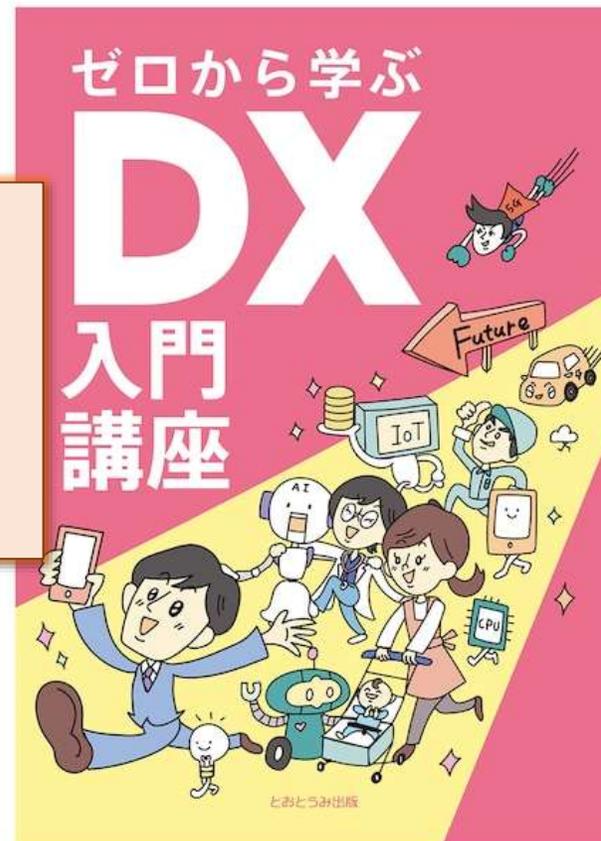


eラーニング

講師: 竹井俊文

https://www.cogaku.co.jp/iot_ai/dxseries/

DX:
Digital
Transformation
(デジタル変革)



書籍 著者: 竹井俊文
(コガク, とおとうみ出版)

ゼロから学ぶDX入門講座 | 竹井俊文
|本|通販|Amazon



eラーニング「ゼロから学ぶ生成AI」

https://www.cogaku.co.jp/iot_ai/zerokara/#c_D37B



ゼロから学ぶ生成AI
1時間で要点チェック！

生成AIを、絶対に敵に回してはいけない。
「生成AI」の正体を知る！

- 1章 **生成AI** のこと知っていますか？
- 2章 **DX** 思考で学ぶ、**生成AI** による 課題解決
- 3章 **生成AI** の**正体**は、これだった！
- 4章 **生成AI** を、絶対に**敵**に回してはいけない！
- 5章 **生成AI** には、**プロンプトエンジニアリング** が必要！

講師：竹井俊文

ビジネス変革 したいけど、
デジタル はちょっと…という方

生成AI を **うまく** 使えば
DX推進 できます！



生成AIにダマされないための
統計学の基礎

- 1章 今、社会で起きている、**データ**と**AI** の**民主化**
- 2章 **DX** ビジネス変革は、**統計学** を基礎としている
- 3章 **統計学** の**本質**は、数学ではなく、**人間臭い哲学**
- 4章 **ビジネス**と**社会生活**で役に立つ **統計学** の基礎
- 5章 **統計学** の心得があると、**生成AI** に**ダマ**されない

講師：竹井俊文

eラーニング「生成AIにダマされないための統計学の基礎」

https://www.cogaku.co.jp/iot_ai/category-2/#c_D47B



「数式・Pythonなし でわかる ディープラーニング入門」

https://www.cogaku.co.jp/iot_ai/category-2/?prev_id=1089



① 基礎編

① 基礎編

- 1章 **DX推進**によるビジネス変革とは？
- 2章 **デジタル技術**：AI、IoT、5Gの役割
- 3章 **脳生理学**から見た**統計モデル**と**ニューラルネット**
- 4章 **ビッグデータ**と**機械学習**による**社会課題の解決**

② 実践編

- 1章 **ディープラーニング**の**必要性**と本質的な**なしくみ**
- 2章 **ディープラーニング**の**できること**、**できないこと**
- 3章 **ディープラーニング**導入の流れとPoC、**AI倫理**
- 4章 **次世代ディープラーニング**と**量子コンピュータ**

生成AI に不可欠な **自然言語処理**
と **量子コンピュータ**

を **単純明快** に解説します！



『数式・Pythonなしでわかる ディープラーニング
入門』 ①**基礎編** ②**実践編**(竹井俊文 著, コガク)

『ゼロから学ぶ 5G入門講座』

- 1章 5G のこと知っていますか？
- 2章 5G は、今までの有線／無線と、何が違うの？
- 3章 5G を導入すると、何が出来るようになるの？
- 4章 身近に感じるような5G の活用例、ありますか？
- 5章 **ビジネス現場**で5G を導入する**メリット**は？
- 6章 今から5G を始めるには、何が必要となるの？



『ゼロから学ぶ 5G入門講座』
(竹井俊文 著、コガク, とおと
うみ出版)

『5G入門講座 実践編』

- 1章 5G × IoT × AI による**データ駆動型ビジネス**
- 2章 ローカル5G による**自営網のデジタル化**
- 3章 ローカル5G の**ユースケース**と新サービス
- 4章 ローカル5G は**誰が, どこで, いつから?**



『ビジネスパーソンのための 5G入門
講座』実践編 (竹井俊文 著、コガク) 7

電波新聞／電波新聞デジタル 2020年～2022年連載 「5Gがくる」 (ローカル5Gによって変わる社会) 1～110回

5Gのテクノロジー

- ・コロナの襲来でローカル5Gが加速<連載第1-3回>
- ・「ミリ波」は新たな武器となるか?<4-5>
- ・4K/8K映像が切り開くニューノーマル<6-8>
- ・5GにとってWi-Fi6は敵か、味方か?<27-31>

ローカル5Gによって変わる社会

- ・5Gが変えるコロナ後のテレワークと遠隔教育<9-14>
- ・超高信頼・低遅延ワイヤレスMC<15-18>
- ・「ローカル5G」でないとできないこと<19-21>
- ・企業ネットワークをローカル5Gに移行する<32-37>

ローカル5Gによるビジネス変革

- ・地域課題解決型ローカル5Gビジネスモデル<43-48>
- ・ドイツに見るデジタル化5G:インダストリ4.0<49-56>
- ・ダイナミック・ケイパビリティ<57-64>
- ・北欧に学ぶローカル5G導入障壁の突破方法<65-72>

DX=5G×IoT、AI&ロボット、メタバース

- ・5Gデジタルトランスフォーメーション (DX) <22>
- ・ローカル5G×VRでビジネスが広がる<23-26>
- ・アフターコロナのDX&ローカル5Gを占う<73-79>
- ・5G×ディープラーニング=DXになる<80-88>

DXリテラシー、5G&DX人財育成

- ・企業内にローカル5G人財を育成する<38-42>
- ・5GはVUCA時代を乗り切るビジネス基盤<89-98>
- ・アジャイルによるDX推進者の早期戦力化<99-107>

「よく学んだ。
また会おうぞ」



デジタル人財

「城の能力を生かすも
殺すも人次第」

ローカル5G

天下布武



日刊工業新聞 雑誌連載

(金属加工業向け)

『型技術(月刊誌)』

2021年～2023年 連載(1～16回)

「ノーマル時代のDX (デジタル変革)を考える」



- 第1回 最近流行のDX、「X」とは？
- 第2回 最近流行のDX、「D」とは？
- 第3回 デジタル技術(IoT/AI/5G)が変革を推進
- 第4回 デジタル化はワイヤレス(無線)化から始める
- 第5回 超高精細映像×AI×5Gでビジネス課題を解決
- 第6回 VR/ARバーチャル空間でビジネスを解決
- 第7回 ディープラーニングでビジネス課題を解決
- 第8回 ローカル5G/Wi-Fi 6で自営網を超高速化
- 第9回 クラウドサービスで中小企業DXを実現
- 第10回 工場をスマートファクトリーに変身させる
- 第11回 スマートファクトリーをめざしてDXを推進
- 第12回 競争に勝つDX人材を自社で育てるリスクリング
- 第13回 自社のDXリテラシーを高め、優位性を確立
- 第14回 今、DXの内製化が求められている理由
- 第15回 中小企業におけるDX内製化は可能か？
- 第16回 中小企業のライバル企業同士がDX推進

量子コンピュータ技術解説書(共著)



量子アニーリング 早わかり

竹井俊文 著、MCPC

MCPCモバイルコンピューティング推進コンソーシアム
AI&ロボット委員会 量子コンピュータ推進WG

技術解説書「量子コンピューティング最前線 2023」

1. 量子コンピューティング技術	3
■ イジングマシン技術の研究開発動向	3
慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 慶應義塾大学 WPI ヒト生物学-微生物叢-量子計算研究センター (Bio2Q) 早稲田大学グリーン・コンピューティング・システム研究機構 東京工業大学国際先駆研究機構 田中 宗	
■ 量子ビットの様々な方式と超伝導パラメトロンデバイス	9
日本電気株式会社 白根 昌之、矢田部 彰宏、山本 剛	
■ 組合せ最適化問題を高速に解くデジタルアニーラの活用技術	15
富士通株式会社 宇都宮 啓宏、川合 遼、左尾 将隆、渡邊 裕之、武捨 悠一、橋本 伸一	
■ 量子インスパイアード最適化ソリューション SQBM+ ~シミュレーテッド分岐マシンの進化と社会実装への取り組み~	20
東芝デジタルソリューションズ株式会社 岩崎 元一	
■ CMOS アニーリングによる新しい価値創造その普及を促進する Annealing Cloud Web	28
株式会社日立製作所 山岡 雅直、山本 佳生、真下 まゆ美	
2. 社会実装事例とその技術紹介	36
■ デジタルアニーラの材料開発応用事例	36
富士通株式会社 實宝 秀幸	
■ 量子コンピュータをモノ作りに活かす	42
株式会社デンソー 門脇 正史	
■ 電力消費量削減に向けた設備運転計画の最適化	47
株式会社野村総合研究所 渡辺 和泉、砂長谷 健、大野 真一朗、高橋 是清	
■ 事例紹介：保守部品の配送計画最適化の取り組み	51
日本電気株式会社 上野 瑛士、伴内 光太郎、家志 門太、泓 宏優、千嶋 博	
■ イジングマシンによる勤務シフトの自動作成とその実証	57
株式会社 KDDI 総合研究所 齋藤 和広、KDDI 株式会社 岡本 浩尚 株式会社日立製作所 山本 啓介、株式会社 KDDI エボルバ 川田 慎人	
■ DX における量子コンピュータの役割	61
株式会社グルーヴノーツ 田中 孝	
■ 離散事象シミュレーションソフト FlexSim の特長と活用事例	66
株式会社ゼネテック 横田 貴史、佐藤 真樹	
3. 付録	70
■ 量子アニーリング早わかり	70
モバイルコンピューティング推進コンソーシアム 竹井 俊文	

生成AIのコアモデルである **ディープラーニング**の開発者であり、**"AIの父"**とも呼ばれる **ジェフリー・ヒントン博士**が、2024年のノーベル賞を受賞したのは、**驚き**でした。

しかし、彼はなぜ、**"物理学"**の分野において重要な発見を行った人物に授与される「**ノーベル物理学賞**」を受賞したのでしょうか？

その理由は「**量子物理学**」と「**知能情報学**」の共通点にあります。すなわち、「**量子コンピュータ**」と「**生成AI**」は、**同じ基本原理的技術**で動かしている という意外な**事実**を知らなければ、理解できないかもしれません。

逆に、それを知ることによって、**技術革新**のスピードに追いつけない今の時代、「**生成AI**」の次に「**量子コンピュータ**」を学ぶために必要となる**二馬力**を、**一馬力の労力**で学ぶことができます。

本講座では…… **難解な「量子コンピュータ」を 楽に、楽しく学ぶ ヒント**を解説します。

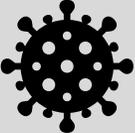


さて、今までの常識が覆るような
想定外なことが、いつ起きても 不思議ではない…

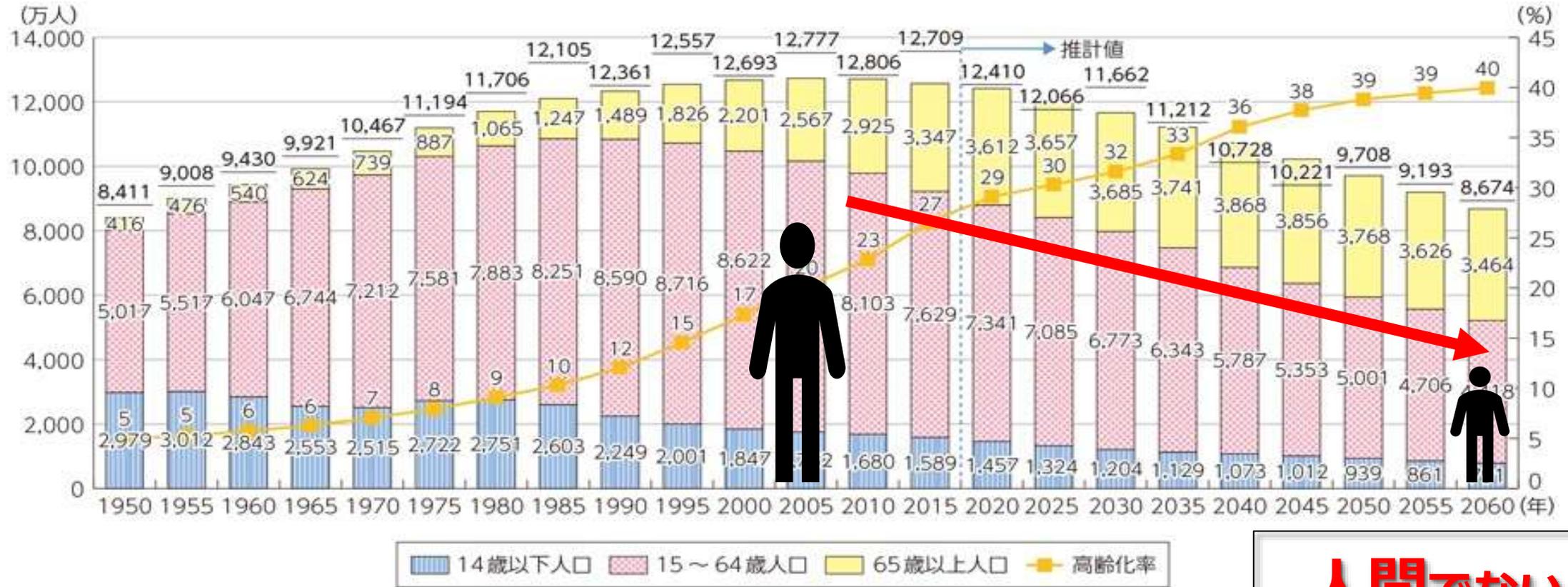
不確実性の時代

そういう社会背景に、奇しくも登場した **生成AI** と **QC**

QC: Quantum Computer, 量子コンピュータ, 量子計算機

- 避けられぬ **「少子高齢化問題」** … 深刻な現場の状況！ 
- 2019年末から **「新型コロナウイルス感染拡大」** … まだ終息とは言えない状況！ 
- そして… **「ウクライナ情勢の急変」** 「イスラエル・パレスチナ情勢の急変」…
- 加えて、**大地震**や**大水害**による **「サプライチェーンの寸断」** など、 
- 直近の、 **「トランプ関税ショック」**による **「サプライチェーンの見直し」** など、

少子高齢化による… 深刻な 人手不足



我が国の人口の推移

生産年齢人口は
2060年には **45.9%減** まで減少…

(出典) 総務省 情報通信白書29年度版

これが
 本質的な問題
 だと思っ！

人間でないと
 できない
仕事が停滞！
 ⇒ 世界との競争
 力の低下

今、まさに… **DXビジネス変革** は 焦眉の急！

社会背景

少子高齢化

コロナ禍

ウクライナ情勢, 他

地震, 水害などの天災

トランプ関税ショック

ビジネス背景

人手不足

ニューノーマル

サプライチェーンの寸断・見直し

グローバル競争の激化

従来の「改善」ではなく、**ビジネス変革** のニーズ

今まで **アナログ** では **できなかつた**
ビジネス課題の解決, 新ビジネスの創造



デジタル変革 = DX

デジタル・トランスフォーメーション

しかし、DX は 手が届かない!

AI と 量子コンピュータ(QC) が 新たな主役なのに…

理由:

～**難解**な技術※と 高いコスト～

AI: **データ** と **機械学習(ファインチューニング)**

QC: **量アニーリング方式** と **量子ゲート方式 (未)**

の ハードル (敷居) の高さ

※ 数学, 知能情報学, データサイエンス, 量子物理学
イジングモデル/QUBO, Python言語など…



ところが... データとAIの民主化として、生成AIが登場

社会背景

少子高齢化

コロナ禍

ウクライナ情勢, 他

地震, 水害などの天災

トランプ関税ショック

ビジネス背景

人手不足

ニューノーマル

サプライチェーンの寸断・見直し

グローバル競争の激化

デジタルの民主化



データの民主化 & AIの民主化の

新たなテクノロジーとして

生成AIがDXビジネス変革に受け入れられた!

- OpenAI ChatGPT
- Microsoft Copilot
- Google Gemini
- DeepSeek

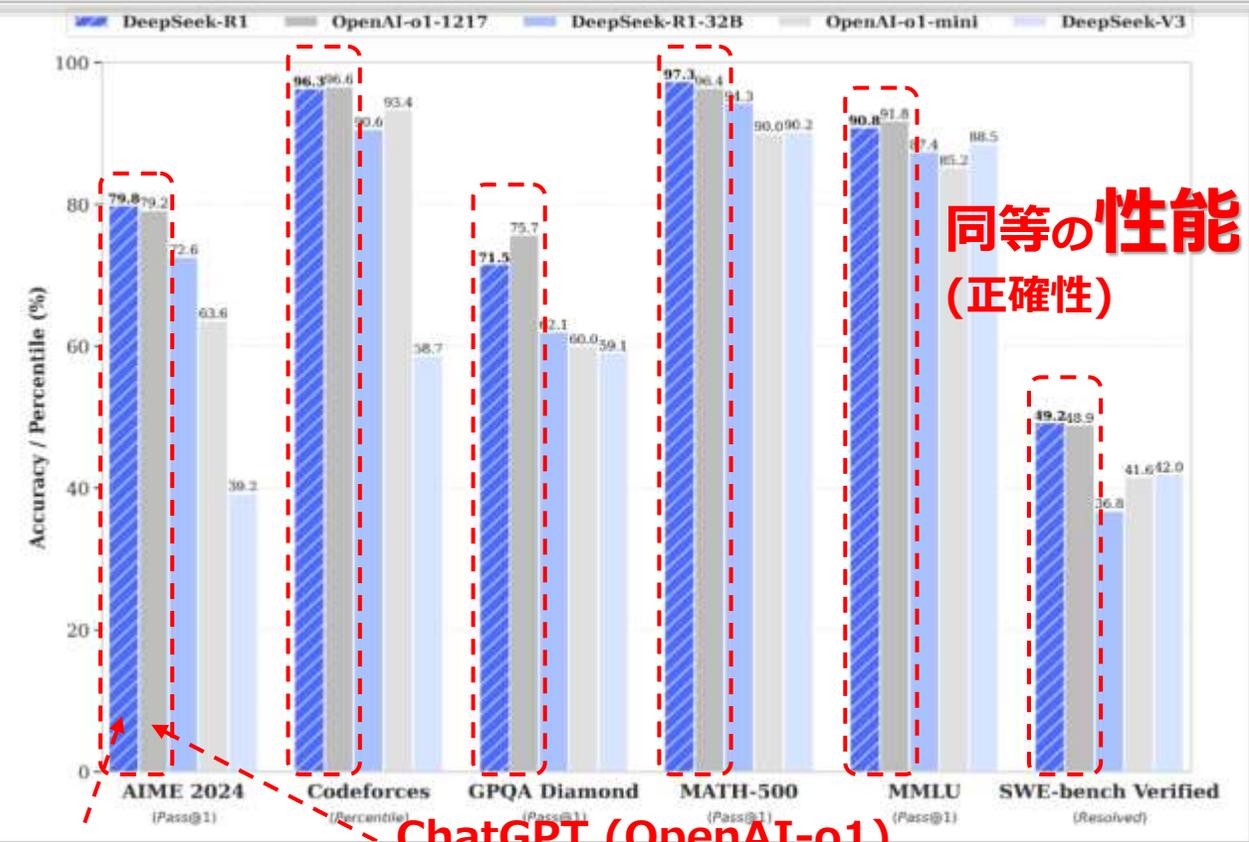
DeepSeek によって加速する AI のコモディティ化



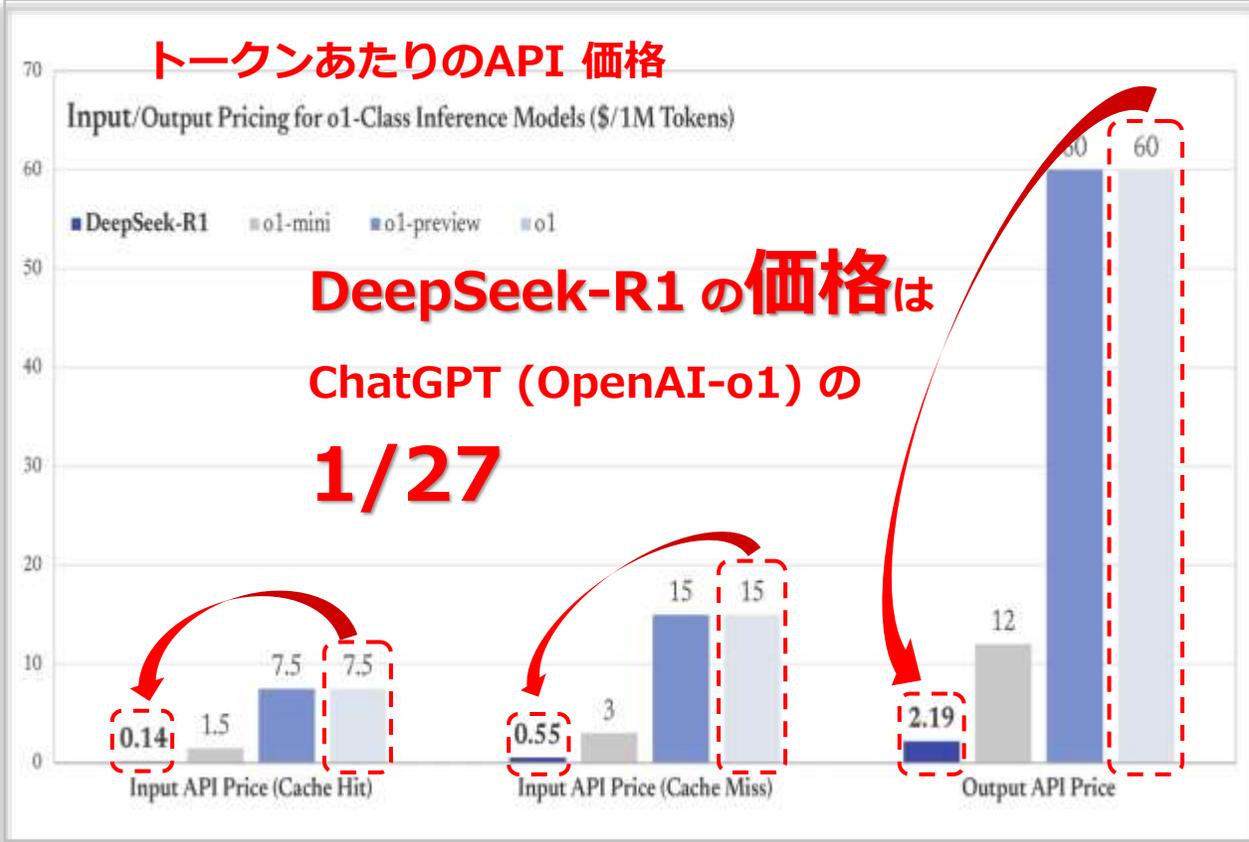
2025年 4月 23日 水 13:00~14:00

コガク セミナー 講師: 竹井俊文

ゼロから学ぶ中国の驚くべき生成AIとChatGPTとの大きな違い。DeepSeekって何？ どうして世界中が驚いたの？ トランプが即座に反応した理由がわかる、AIの破壊的イノベーション！ 他



同等の性能
(正確性)



DeepSeek-R1 の価格は
ChatGPT (OpenAI-o1) の
1/27

DeepSeek-R1

ChatGPT (OpenAI-o1)

(出典) <https://api-docs.deepseek.com/news/news250120>
赤破線・矢印, 赤字は筆者が追記

AI のコモディティ化 : ← deepseek

ChatGPT が市場に登場した際, 革新的な生成AIサービスの**高付加価値**が認識されていた。その後、市場が活性化した結果, **開発コストの低減化**を伴う 更なる **AI の民主化** と **イノベーション** によって **DeepSeek** が新たに登場し, サービス機能・性能などで差がなくなってしまう “**コモディティ化**” が起こった。

しかし、量子コンピュータ(QC)
のほうは…

民主化・コモディティ化は

まだ先 かも？！

純国産の量子計算機、万博で8月公開 阪大とアルバック

2025年4月12日 16:00

大阪大学やアルバックなどは、日本製の部材のみを使って開発した初の純国産量子コンピューターを8月にも大阪・関西万博で公開する。

大阪大学の豊中キャンパス（大阪府豊中市）に設置した量子コンピューターを万博来場者がオンラインで体験できるようにする。

純国産化によって、関連市場における日本の存在感を高められるほか、**経済安全保障**上の意味も大きい。

3月から**阪大の豊中キャンパス内**で量子コンピューターの組み立てと機器の調整を進めており、8月までに完成させる。

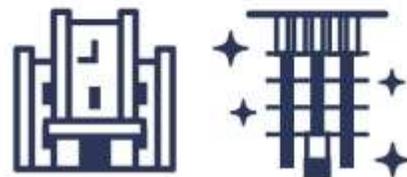
今回の純国産の量子コンピューターは**国の研究プロジェクト「ムーンショット」**の支援で開発された。

(出典)

<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOSG102YP0Q5A410C2000000/>

純国産量子コンピューターを8月に
万博でオンライン公開する

大阪大学豊中キャンパスに設置する純国産量子コンピューター



来場者が量子コンピューターをオンラインで体験できるようにする



万博会場(夢洲)

万博後は量子コンピューター向けの
新規部材開発の試験機に

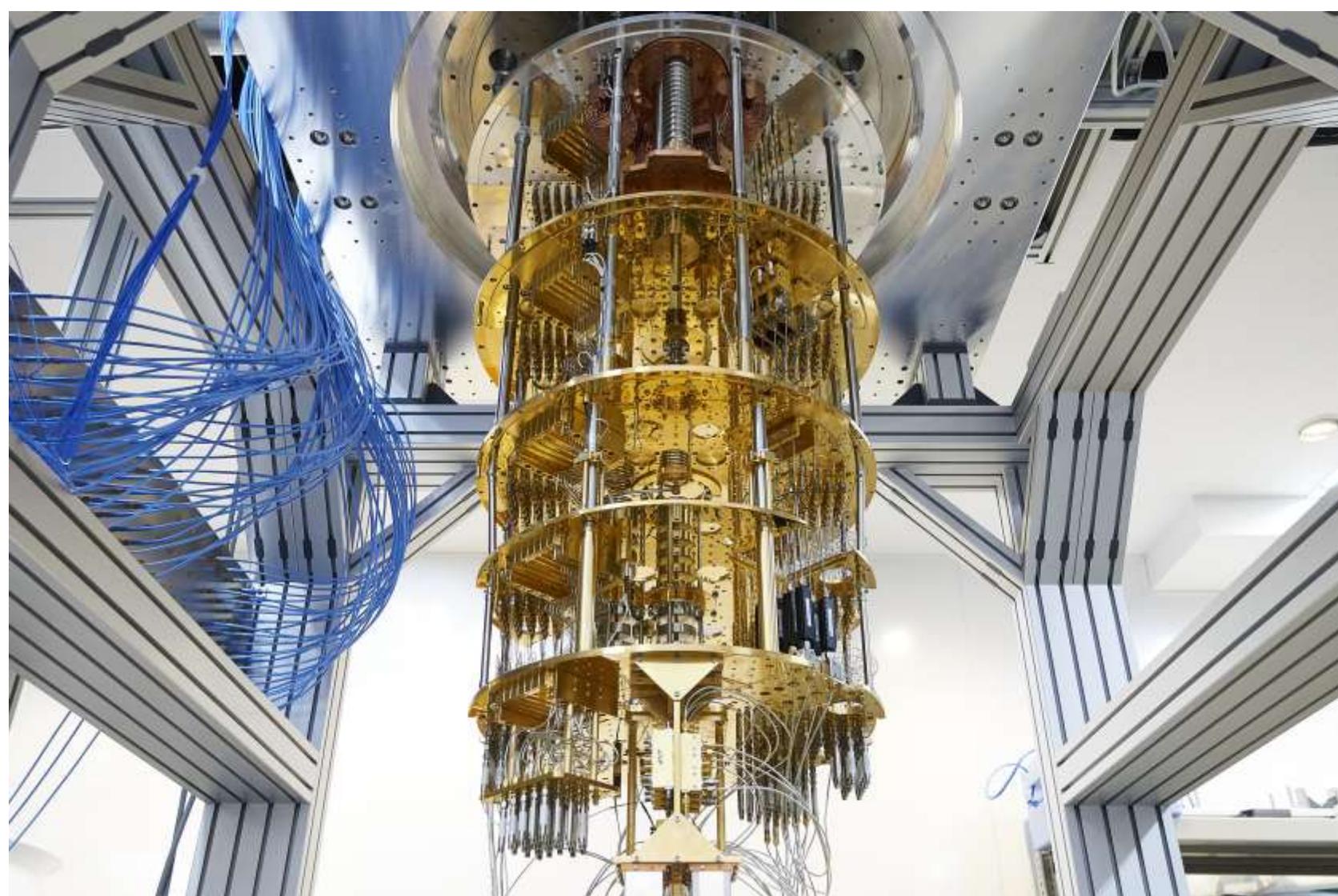
日本の存在感を関連市場で高める

大阪大学

2023年、日本は

“**国産量子
コンピューター元年**”

を迎えた。

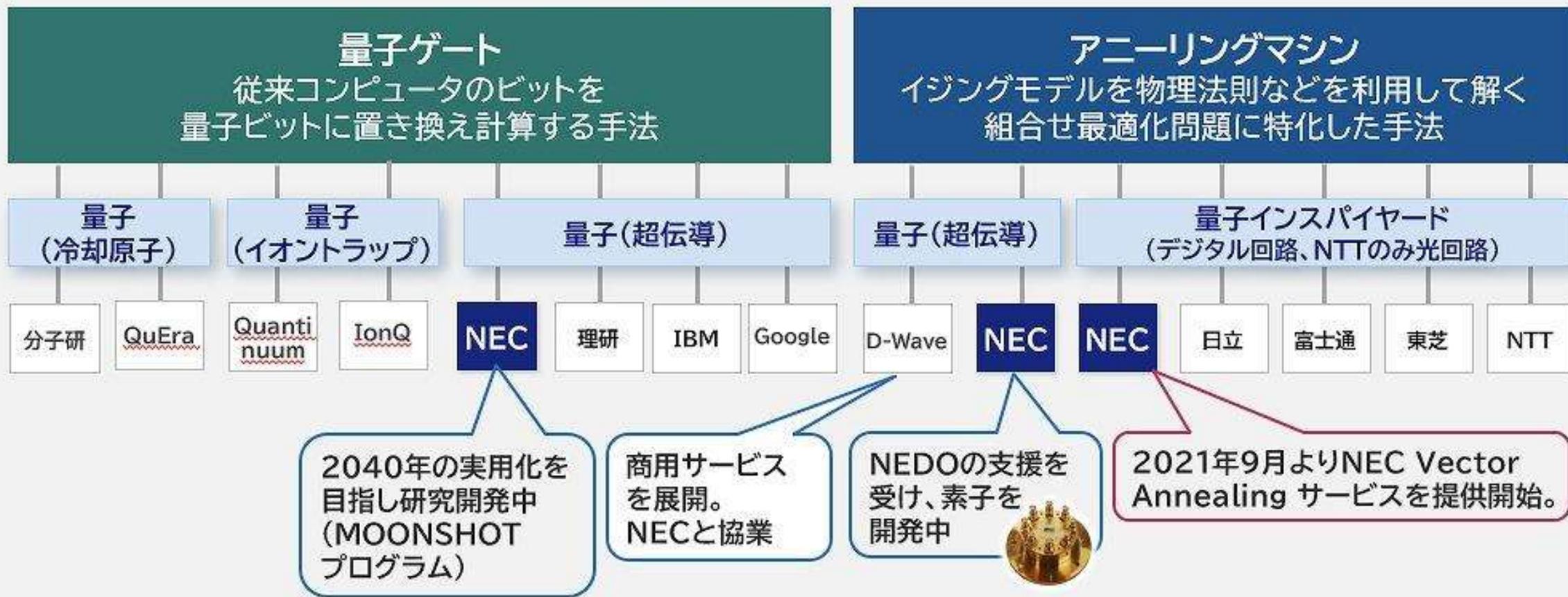


3月、国産初の量子コンピューターが**理化学研究所**で稼働を開始。10月には2号機を**富士通**で、12月には3号機を**大阪大学**で稼働し、クラウドサービスを通じて外部から利用可能となっている。

(出典) 大阪大学 https://dialogue.osaka-u.ac.jp/182/?fbclid=IwY2xjawJpT7RleHRuA2FlbQIxMAABHkwAUWB5Du7FDeorNSkkU7Q2ZZCD-G7KVFUmRpmkX6SKTMTsYSnXvEpeipmQ_aem_0VMwGR2uQzOMNn9fihIAAnA

量子コンピューティングの分類

量子コンピューティング (量子の振る舞いを取り入れたものを含む広義)



※NEC調べ(紙面の都合上、必ずしも全ての研究機関を網羅しているわけではありません)

ここで、クイズです…

AIと関係あるものを、線で結んでください！

AI
(人工知能)

自動運転

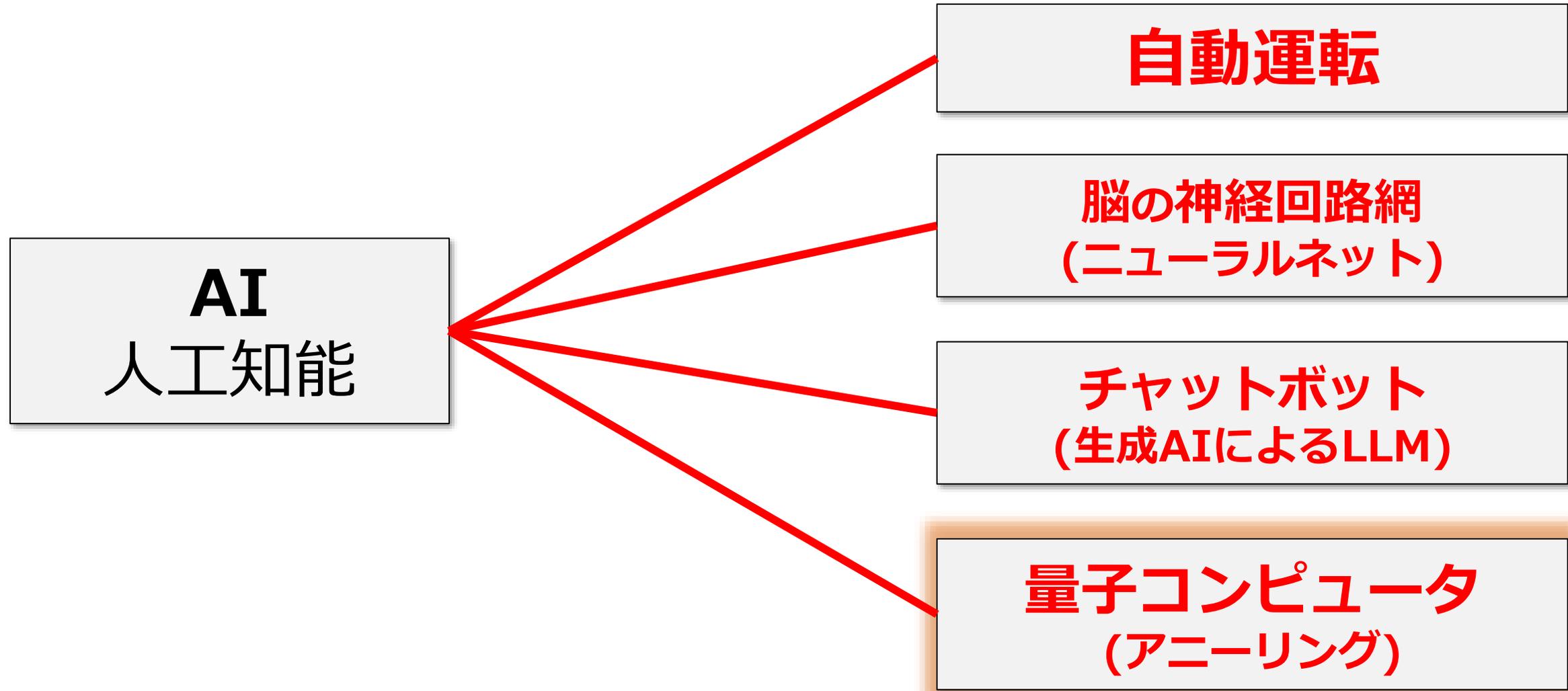
脳

チャットボット

量子コンピュータ

実は、すべて関係あるのです！

量子コンピュータ(アニーリング方式)も、AIに関係あります



もう一つ、クイズです…

量子コンピュータと関係あるものは？

量子コンピュータ

ビッグデータ

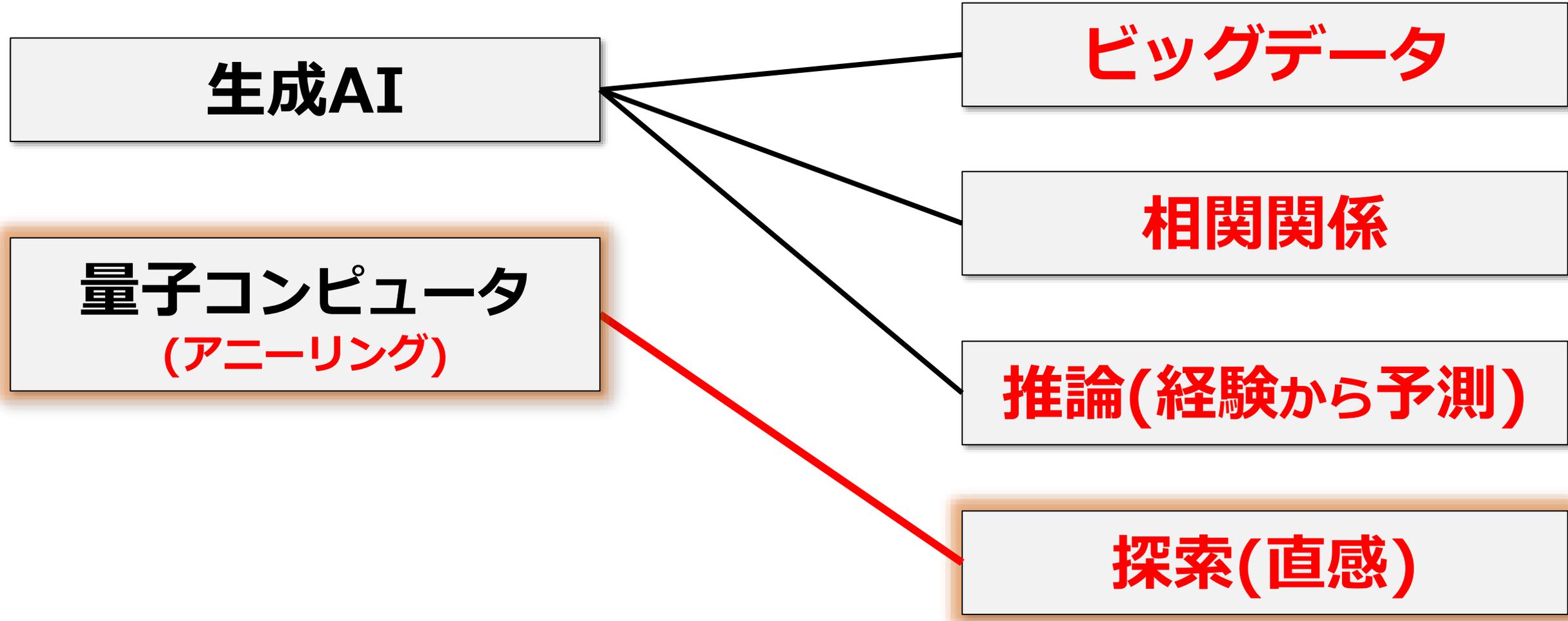
相関関係

推論(経験から予測)

探索(直感)

量子コンピュータは、いわば「直感・勘」です！

他は、生成AI(ディープラーニング)に関係あるものです



さて… AI (人工知能) は何をめざす？



ヒトの脳 は **得意** だが、**コンピュータ** には **苦手**な **情報処理**

コンピュータのように、1ステップずつ論理を進めるのではなく…

「**パターン認識**」

画像/音声の**相関関係**から、ヒト・モノ・文字を **識別** する能力

「**アナロジーによる推論**」

過去の経験から **因果関係**や**相関関係**を導き **予測** する能力

「**自然言語処理**」

会話から単語や句等の**相関関係**を導き 人間と**意思疎通**する能力※

「**ヒューリスティックな探索**」

直感や**勘**による決断等、意思決定に必要な **最適解** を求める能力

(出典)上記の「 」は1961年ミンスキー発表論文「AI へのステップ」から。

※ (著者が追記) 語彙の強弱・抑揚・息遣い、顔の表情や身振り手振り、グラフィック等の視覚情報も含む(メラビアンの法則)

これらは…**ヒトの暗黙知** (何故できるのか? を説明できない)

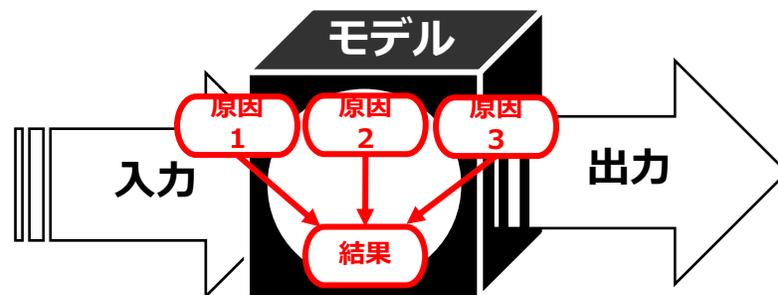
「脳」を模倣したモデルと、「量子」を応用したモデル



データ

観測値, 測定値などに潜む抽象的な **因果関係**

ベイジアンネットワーク



予測(確率推論)

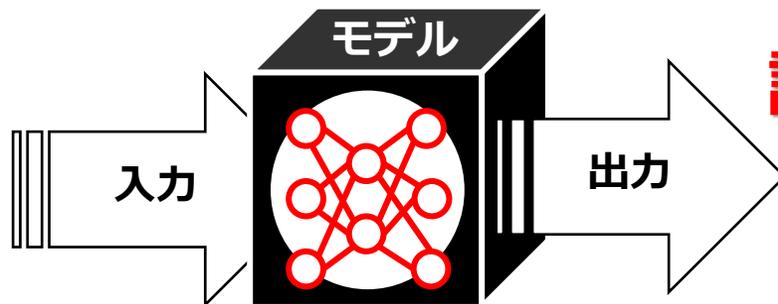
因果関係グラフ
原因・結果の確率



データ

画像, 動画, 音声, テキストなどに潜む **相関関係**

ディープラーニング



識別(予測・分類・クラスタリング)

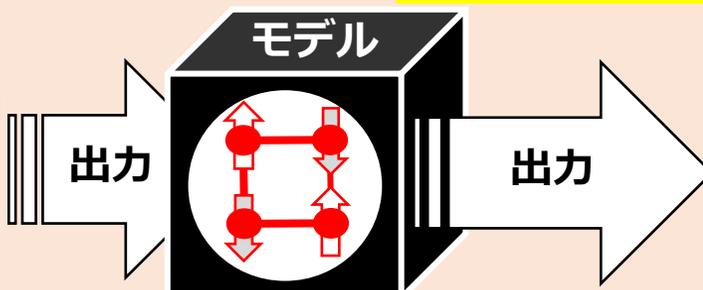
画像等のパターン認識, 行動予測
異常検知, 自然言語処理

量子コンピュータ(アニーリング)



データを必要としない

ヒューリスティック
(直感的) な探索

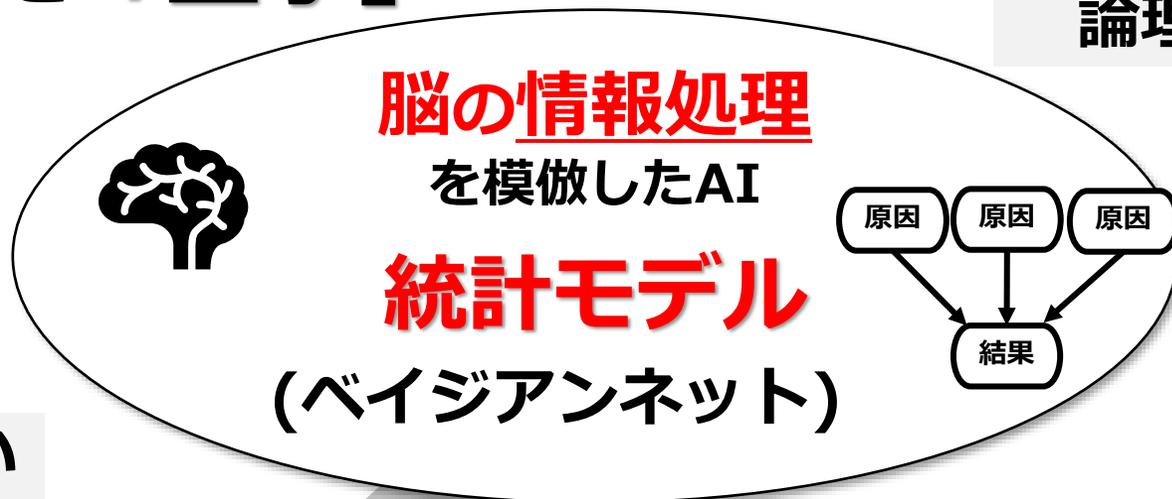


最適解

組合せ最適化問題
(巡回セールスマン問題など)

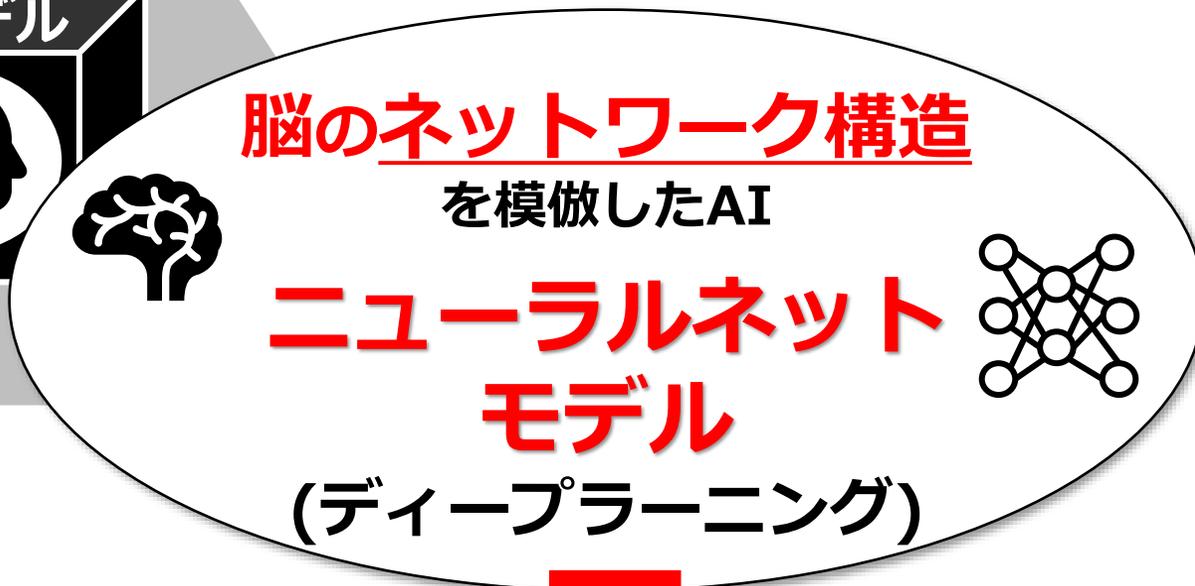
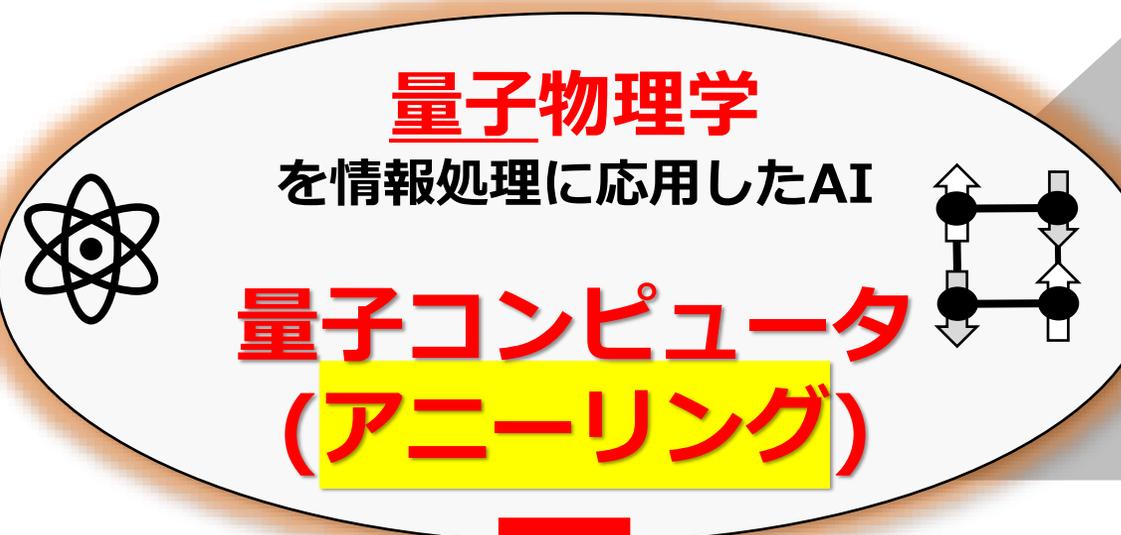
AIのモデルは「脳」と「量子」

ヒトの思考と同じ
論理・確率・統計



量子(粒子&波動)の振る舞い

神経回路網の振る舞い



データを必要としない

ヒューリスティックな探索

データ ⇒ **相関関係**

ヒューリスティック探索：

問題解決においては、決断や意思決定に必要な「最適解」を求める能力も必要とされる。

例：大小の品物を積んで点在する顧客へ効率良く届ける配送管理や、勤務条件や状況がそれぞれ異なる販売員のスケジュール管理において、多くの「組み合わせ」の中から、管理者は経験と勘によって「最適解」，すなわち一番効率的な配送ルートや勤務シフト表を決定することが多い。

数式による決定論的計算や、データによる推論的分析によって、時間をかけて解を探索するのではなく、即座に解を探索して発見する「発見的方法」によって、素早く「最適解」に到達する方法である。
(人間の場合、脳の振る舞い = 「直感」。マシンの場合、量子の振る舞い = 「アニーリング」)

組み合わせ最適化問題：

「巡回セールスマン問題」は困難さを示す代表例。セールスマンがいくつかの都市を一度ずつ訪問し全ての都市を巡回し終え出発点に戻ってくる際，その移動距離が最小になる経路を求める問題。仮に，30都市の全経路を計算し最適解を求めるには，古典コンピュータ：スパコンでも百億年以上かかる。

従来，問題毎にアルゴリズムによる「最適解(厳密解)」の探索が古典コンピュータによって行われていたが，新たに「量子の振る舞い」を応用した量子コンピュータの「量子アニーリング」や，その計算過程を古典コンピュータ上で模擬した「シミュレーテッドアニーリング(模擬量子)」が登場し，ビッグデータを必要とせず，瞬時に高精度な「最適解(近似解)」を探索できるようになった。

「量子コンピュータ」には、2つある

量子ゲート

汎用計算

目的

※量子ビット(0/1 不確定)を組合せたデジタル演算回路、原理的には従来のコンピュータに近い

強み

古典コンピュータを大きく上回る高速化アルゴリズム

弱み

ノイズに弱い。NISQ 誤り訂正制御が必要。集積が難しい

現状

433量子ビット

実装

IBM, Google, Rigetti 等

量子アニーリング (イジングマシン)

組合せ最適化問題

(配送, 流通, 交通, 資源割当, 仕事割当, 金融, 生産計画, 多品種少量生産, 通信, 電力, ガス等)

量子シミュレーション

(創薬, 材料, 化学合成, 燃料電池など)

機械学習

ノイズに強い。商用化と社会実装が進んでいる。機械学習の課題解決など, AIを加速させる

用途が限定されている。解きたい問題をイジングモデル から QUBO に数式変換するのが難しい

量子 (超電導回路): 5,000量子ビット

疑似量子 (デジタル回路): 30万量子ビット

量子: D-wave, NEC等

疑似量子: 富士通, 日立, NEC, 東芝等

量子アニーリング

シミュレーテッド アニーリング

身近な「組み合わせ最適化問題」の例：

「最適化問題」：制約条件($x \in A$)を満たす解の中で 目的関数※ $f(x)$ を最小/最大にする解を求める問題。但し、変数 $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, A =とりうる値の集合。特に、離散値の場合は「組み合わせ最適化問題」

※ 総称。実際は、**コスト関数** (損失関数を正規化したもの), **損失関数=誤差関数**による最小化など

1) 最短経路問題

出発地から目的地までの最短の経路を求める問題 (カーナビのルート検索, 電車・バスの乗換案内)

2) 最大流量問題

目的地へ最大量を流す経路を求める問題 (交通網, 通信網, 電気・水道ライフライン, 石油パイプライン)

3) 配送計画問題

トラック等で配送・収集する最も効率的な経路を求める問題 (郵便, 宅配コンビニ商品配送, ゴミ収集)

4) 施設配置問題

都市施設 (役所, 学校, 病院, 消防署, 店舗, 銀行等) の利便性と収益性を最大にする配置を求める問題

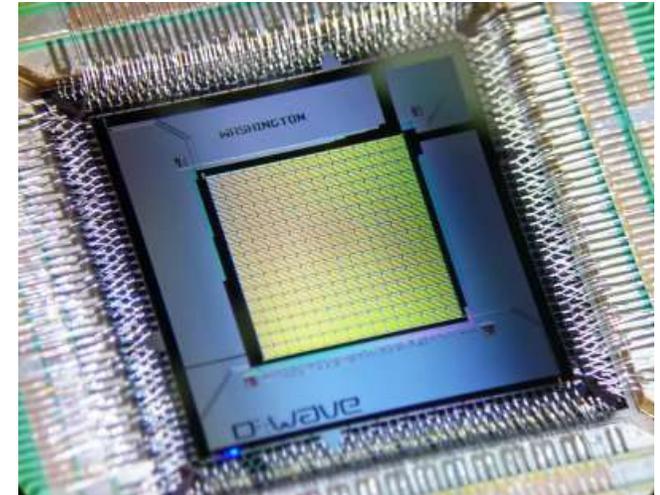
5) スケジューリング問題

従業員・乗務員・看護師等の勤務シフト表, スポーツ対戦の日程表等, 時間軸上の最適な割り当て問題

6) 通信品質問題/資源有効活用問題

無線通信ネットワーク資源 (電波の周波数帯域) を分割した, チャンネル(帯域)の最適な割り当て問題

量子アニーリング (超電導回路)



D-Wave Systems Previews 2000-Qubit Quantum System

(出典) <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-previews-2000-qubit-quantum-system>

黒い大きな箱は、内部を **マイナス273°Cの絶対零度** に保つ**冷凍庫**。内部に格納されている**「量子ビット」のチップ**を絶対零度まで冷やし、**超電導状態** (電気抵抗がない状態) にすることにより、**最適化の超高速処理** を実現する。

シミュレーテッド アニーリング (デジタル回路)

(参考) NECの疑似量子アニーリングサービス

- NECの疑似アニーラサービスは、ビット数を30万規模*に拡大し、求解性能も高速化。クラウドサービスも提供し、組合せ最適化ニーズにいち早く対応。

2022年8月29日プレスリリース**

オンプレミス

クラウドサービス

NEC Vector Annealingサービス

NECのベクトルプロセッサ(高速行列計算・高速メモリアクセス)と、独自アニーリングアルゴリズムにより大規模アニーリング最適化の高速処理を実現

Leap Quantum Cloud Service

D-WaveのLeap Quantum Cloud Serviceを、NECによる日本語サポート含めて提供

量子コンピューティング適用サービス

お客様の業務課題に対して技術検証などトータルにサポート

業務課題抽出
テーマ検討

最適化方式検討
仮説設定

定式化・机上検証
プロトタイプ開発

現場適用検証
チューンアップ

量子コンピューティング教育サービス

お客様のDX化やAI活用を加速する量子コンピューティング人材育成を支援

基礎編

量子コンピューティングとは何か、どのような課題が解決できるのか、短時間で学べるプログラム

実践編

量子アニーリングによる課題解決のプログラミングスキルを獲得できるサービス

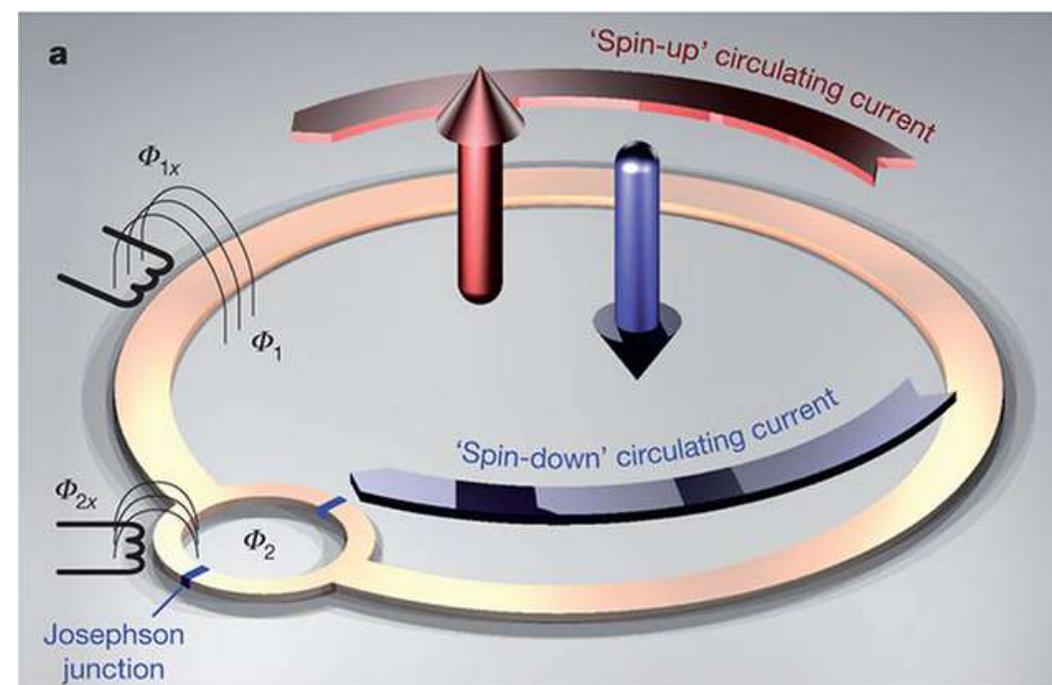
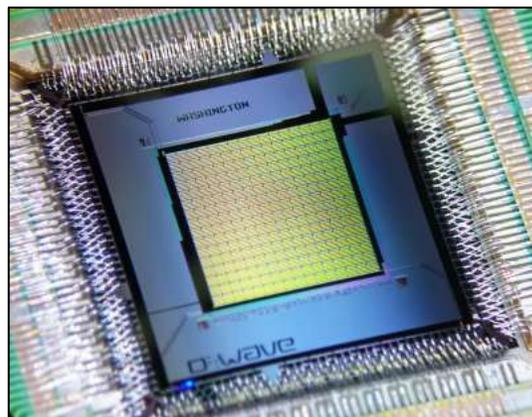
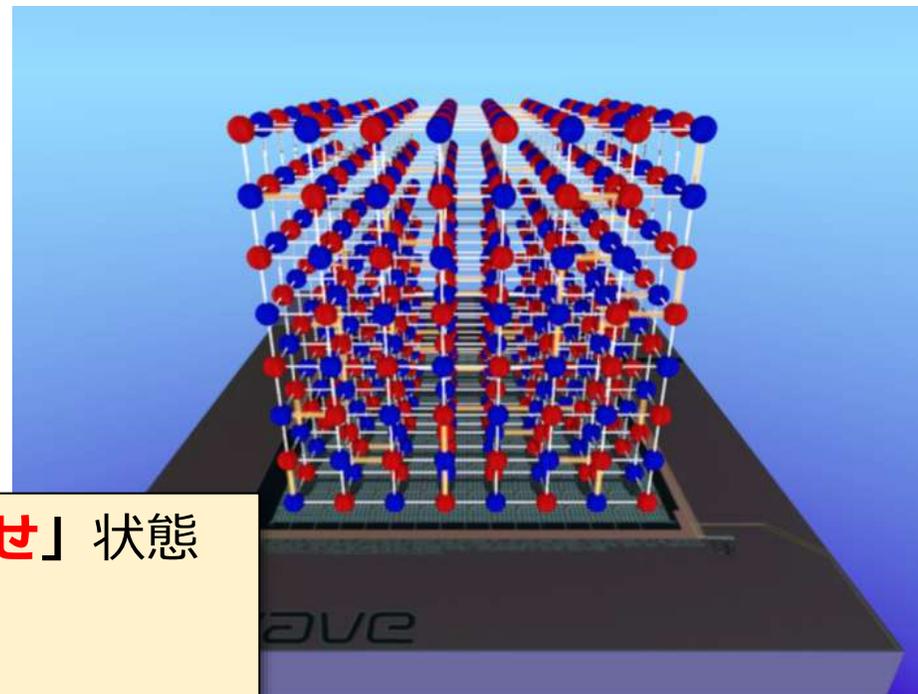
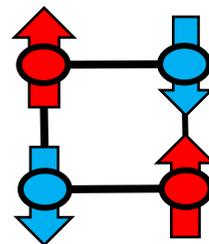
*約500都市の巡回セールスマン問題でも高速に解くことが可能 **https://jpn.nec.com/press/202208/20220829_01.html

(出典) 内閣府 量子技術の実用化推進ワーキンググループ (第3回) 資料2-4-2

https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/jitsuyo_wg/3kai/siryoy2-4_2.pdf

量子アニーリングのしくみ

量子スピンを2次元の格子状に配置
さらに、3次元の格子状に配置



(出典) Johnson et al. Nature 473,194-198 (2011)

量子ビット：上下2通りの可能性 = 量子力学的な「0/1重ね合わせ」状態

量子ビットを増やすと、表現できる数が指数関数的に増える

$$(2^2=4, 2^3=8, 2^4=16, 2^5=32, 2^6=64, \dots 2^{10}=1024, \dots 2^{40}=1兆)$$

量子アニーリング：膨大な可能性の中から「最適解」を選ぶアルゴリズム

量子ビット間の結合に重みづけをし、量子ビット毎の可能性を徐々に消し込み、関係性を入れ込みながら、一つの確定した状態に持っていく

(出典) D-Waveがプログラム可能な大規模量子シミュレーションを実証

量子ビット：

量子とは分子や原子よりも小さい電子などの「**粒子**」であるが、同時にその運動状態を観測しようとしても、捉えどころのない「**波動**」の性質を持つ。それゆえ「+1 (スピン↑)」と「-1 (スピン↓)」の、粒子の相反する(自転)運動状態を重ね合わせ持つ「量子ビット(スピン変数) S 」として表現する。

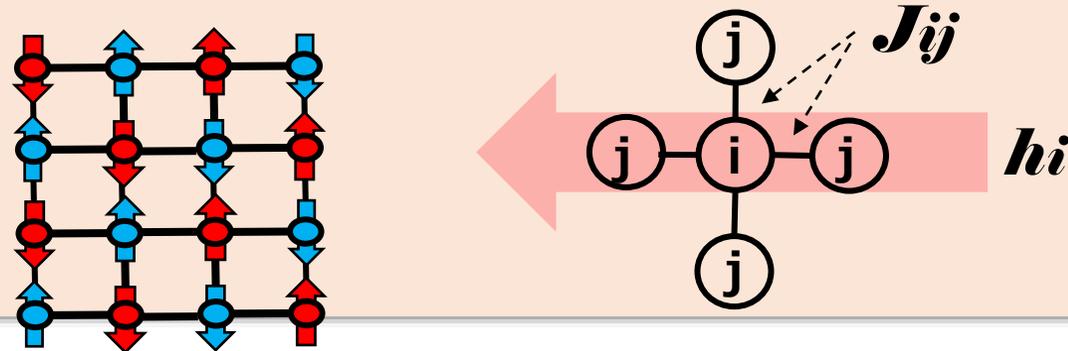
相撲に似ている。相撲の最中は相手を土俵際まで追い詰めたり、逆に追い詰められたりして、勝っている状態(+1)と負けている状態(-1)が重ね合わされた状態がしばらく続いた後、勝負(+1/-1)が決まる。

イジングモデル： 量子ビットを格子状に配列したモデル

統計力学の代表的モデルであり、磁石の性質を表す(スピングラスの)イジングモデル。「↑」と「↓」の二つのスピン状態をとる格子点(量子ビット)から構成され、隣接する格子点間の相互作用と外部から働く磁場の力によって状態が更新される。

イジングモデルは下記の数式にて表される。Hは「ハミルトニアン」と呼ばれる 系(頂点Vと辺Eの集合から成る格子)全体のエネルギー関数 であり、各量子ビットの状態によって変化する。右辺の第1項は量子ビット S_i と S_j 間の相互作用、第2項は S_i に働く局所磁場の強制力であり、 J_{ij} と h_i は定数である。

$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} S_i S_j - \sum_{i \in V} h_i S_i$$



QUBO : ⇐ 「最適解」を探索してもらうため、イジングモデル から数式変換

量子力学を専攻していない限り、イジングモデルの数式とは馴染みが薄い。そのため、二値(+1/-1)の量子ビット(S1, S2, ...) を 馴染みのあるデジタルの二値(0/1)のバイナリ変数(x1, x2, ...) に替えて、量子世界の「イジングモデル」を 人間世界の「QUBO」に落とし込む。

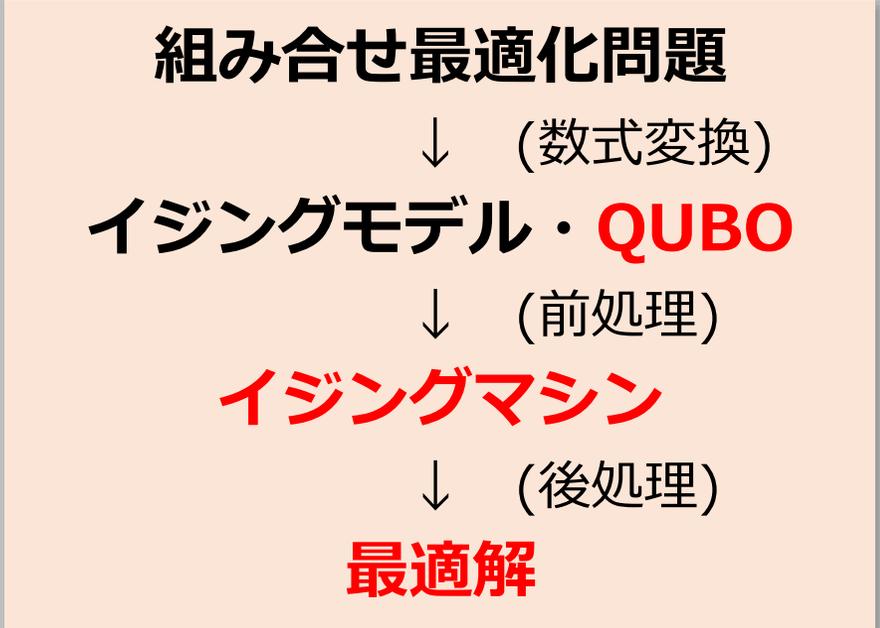
QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization)とは、バイナリ変数の制約が無い場合に限定した比較的扱いやすい高々二次関数の数式を用いることによって難解なイジングモデルを代替する方法。

解きたい問題を イジングモデル から QUBO に 数式変換するのが難しい

分かりやすく言えば...

人間が「組み合わせ最適化問題」に直面した際、
「イジングモデル」という(人間にとって難解な)数式から
「QUBO」という(人間とマシンが理解できる)数式へ変換し、
「イジングマシン様、最適解を教えてください！」と、
「イジングマシン」にお願いをする。

すると即時に、イジングマシン様から
「最適解はこれだ！」とお答えをいただける、便利な方法。



詳しくは
こちらを
ご覧ください！

量子アニーリング早わかり

竹井俊文

モバイルコンピューティング推進コンソーシアム

Quick understanding of quantum annealing

Toshifumi Takei

論文概要

本稿では「量子アニーリング」とは何か？ AI の視点から「ディープラーニング」との比較で解説する。
また量子アニーリングによって革新的な解決が期待される「組合せ最適化問題」とは何か？ 日常生活における身近な例で解説する。最後に、量子アニーリングによる課題解決の方法を例え話でやさしく解説する。

Keyword: ディープラーニング, 組合せ最適化問題, イジングモデル, QUBO

MCPCモバイルコンピューティング推進コンソーシアム
AI&ロボット委員会 量子コンピュータ推進WG

技術解説書「**量子コンピューティング最前線 2023**」

https://www.mcpc-jp.org/pdf/20230331_potential.pdf

イジングマシン： ⇐ QUBOを入力すると、アニーリングによる「最適解」の探索

「アニーリング」とは元々“**焼きなまし法**” (少しずつ温度を下げる等, 変化させながら「最適解」を探索する方法) であり, 人間やコンピュータが得意とする「解を一意的に求める演算」ではない。

それは, 投げたボールが必ず計算された放物線を描いて, 定地点に落ちるようなイメージではなく, つかみどころのない「波動」として振る舞う 目に見えないボールが, 揺らぎながら 穴凹を探索し, 発見した 最適な穴凹 へと落ちるイメージ。

すなわち, **イジングマシン** (量子アニーリング) は, 「時間とともに『イジングモデル 全体のエネルギー』が最小となるような組み合わせに落ち着く」という **統計力学** (統計物理学, 統計熱力学, 量子統計力学も同じ) の自然現象によって「**最適解**」を探索している。

そこで… 人間にも分かるようにするために

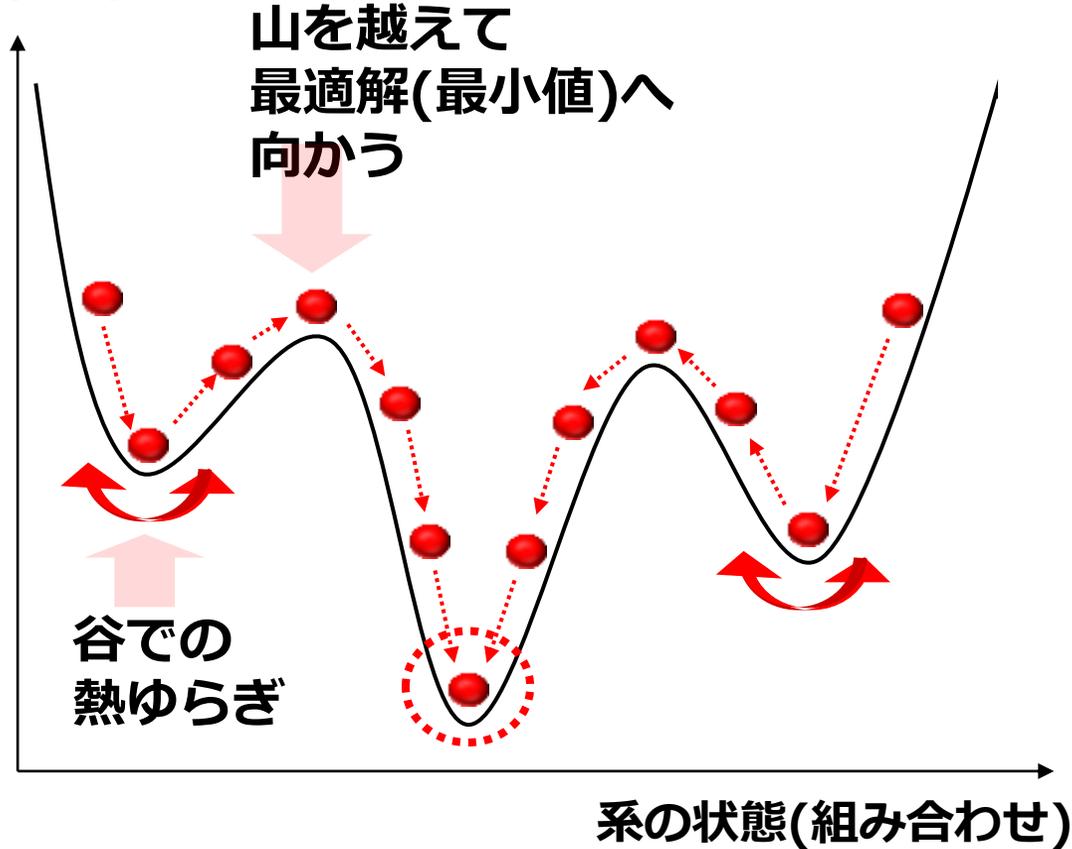
統計力学の難解な「**エネルギー**」を **人間世界**の具体的な「**コスト**」に読み替える。

つまり, 「**時間**とともに『**QUBO のコスト**』が**最小**になるような**組み合わせ**に**落ち着く**」という統計力学の振る舞いによって, 我々が直面する「**組み合わせ最適化問題**」の最適解を探索できる。

組み合わせ最適化問題 ⇒ **コスト関数**の**最小化** ⇒ **イジングモデル・QUBO**
⇒ **イジングマシン**による**エネルギー関数**の**最小化** ⇒ **最適解(最適な組み合わせ)**

イジングマシンによる「最適解」の探索

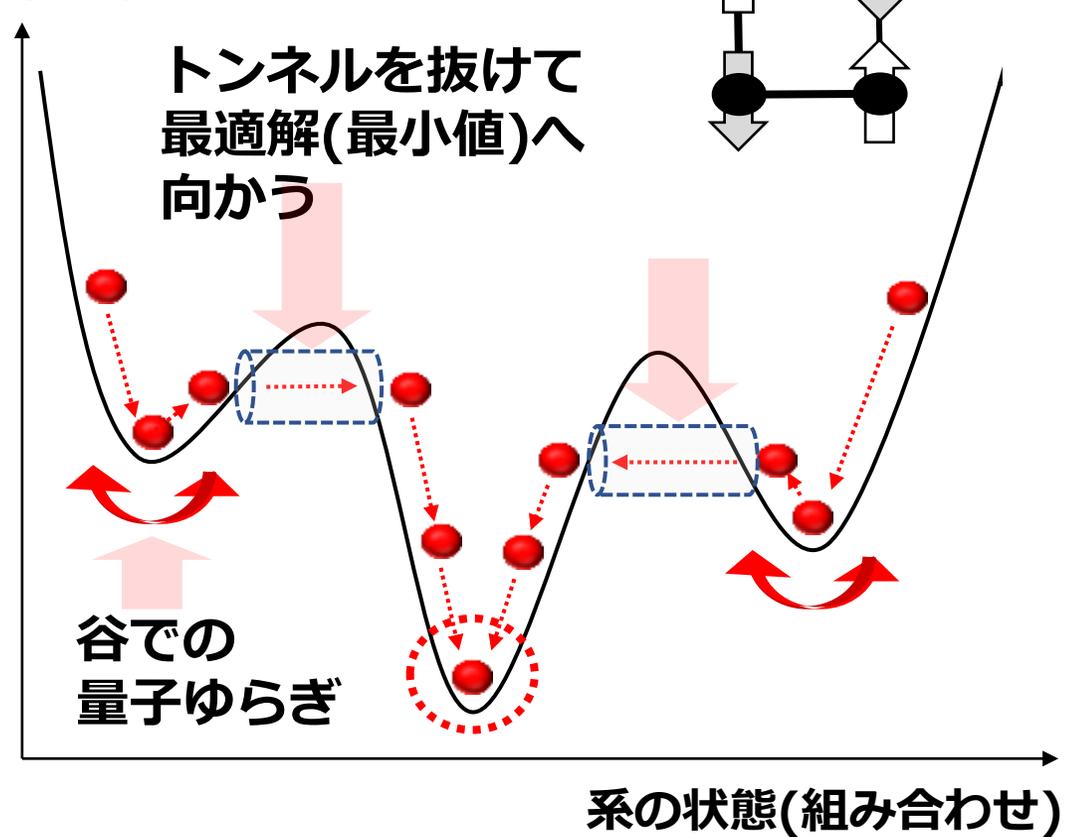
エネルギー



シミュレーテッド・アニーリング (焼きなまし法)

「熱ゆらぎ」利用：温度を徐々に下げて最適解を探索

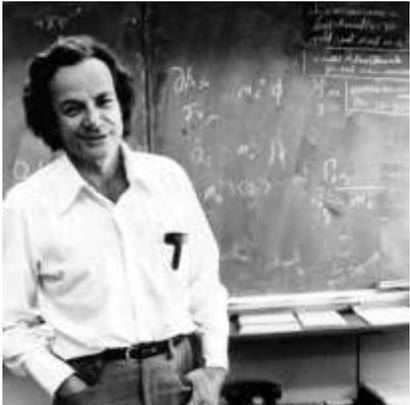
エネルギー



量子アニーリング(超電導回路)

「量子ゆらぎによるトンネル効果」利用
：横磁場を徐々に弱めて最適解を探索

リチャード・ファインマン



アイデアの登場

基礎理論の提案

西森秀稔



ハード開発の進展

実用化の始まり

1981年	物理学者のリチャード・ファインマンが自然をシミュレーションするならば量子力学に基づくコンピューターを作るべきだと主張
1985年	オックスフォード大学のデイヴィッド・ドイッチュが量子コンピューターの基礎理論を提案
1994年	AT&Tのピーター・ショアが量子コンピューターで素因数分解を高速に実行できるアルゴリズムを開発
1995年	ショアやオックスフォード大学のアンドリュー・スティーンらが量子コンピューター向けの誤り訂正理論を提案
1998年	東京工業大学の門脇正史、西森秀稔が量子アニーリング方式を提案
1999年	NECの中村泰信、蔡兆申らが初めて量子ビットのハードウェアを実現
2011年	カナダDウェーブシステムズが量子アニーリング方式のコンピューターを発売
2014年	カリフォルニア大学サンタバーバラ校のジョン・マルチネスらが誤り訂正が可能な精度で5量子ビットの量子コンピューターを開発
	米Googleがマルチネスの研究グループを傘下に収めて超電導方式の量子コンピューターを開発すると発表
2016年	IBMが「IBM Quantum Experience」として、クラウド上で誰でも利用できる5量子ビットの量子コンピューターを公開
2019年	IBMが20量子ビットの量子コンピューター「IBM Q システムワン」を商用化すると発表
	Googleが54量子ビットの量子コンピューター「シカモア」で「量子超越」を達成したと発表
2021年	IBMの商用量子コンピューターが日本国内でも稼働を開始

(出典) <http://juku.netj.or.jp/camp/summer2018/2018/08/02-2/>

(表の出典) 日経XTECH 量子コンピューターの開発はいつ始まった? 量子コンピューターの歴史
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01901/00028/>

「量子アニーリング」理論を応用したコンピュータが登場

— 西森秀稔

(出典) 東京科学大学
(Science Tokyo, 旧 東京工業大学)
<https://www.titech.ac.jp/public-relations/research/stories/faces13-nishimori>

脳の神経回路とスピングラス問題に共通点を見出す

スピングラス問題：統計力学のイジングモデルによる解法

今でこそ量子コンピュータ研究の最先端をいく西森も、高校の頃までは、物理については暗記科目のような印象が拭えず、好きだった数学のようにはなかなかのめり込めなかったという。その西森が東大理科一類から理学部に進学して選択した研究室は、同じ物理ではあるものの量子力学ではなかった。



ついでに、道が開けた。

惹かれ統計力学という分野に飛び込んだ西森は、当時流行っていた「スピングラス」の問題と出会う。これは、スピンと呼ばれるミクロな磁石が多数集まることで発生する磁性に関する問題であるのだが、結果的にこの研究に携わっていたことが、後の「量子アニーリング」理論形成へとつながっていくこととなった。きっかけは90年代に入ってからのこと。1982年に米国の物理学者ジョン・ホップフィールドが発表していた脳の神経回路の働きを数式で示した理論と、「スピングラス理論」との共通点を見出して量子力学の適用を思い

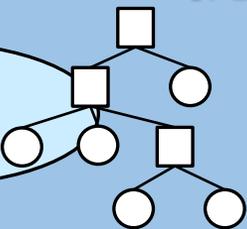
「ちょっとしたヒントで、覚えていることがぱっと全部思い浮かんでくるということがありますよね。この脳の神経回路メカニズムの一端を数式で表すと、実に不思議なことに、スピングラスと非常に似ていたんです。」

その思い出すメカニズムを解明する手段のひとつが、アニーリング（材料開発のプロセスとして用いられる「焼きなまし」の意）であった。アニーリングの研究者は多数いたが、量子力学と組み合わせて研究している者は皆無だった。そこに西森は目をつけたことが、結果的に今につながっているのだ。

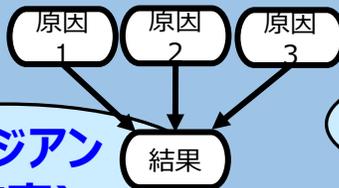
生成AI はディープラーニングのTransformer モデル

統計モデル (数学モデル)

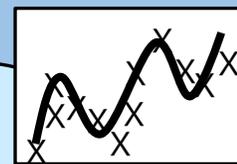
決定木
(論理)



ベイジアン
(確率)



線形回帰
(統計)



AI



脳を模倣した ニューラルネットワーク・モデル

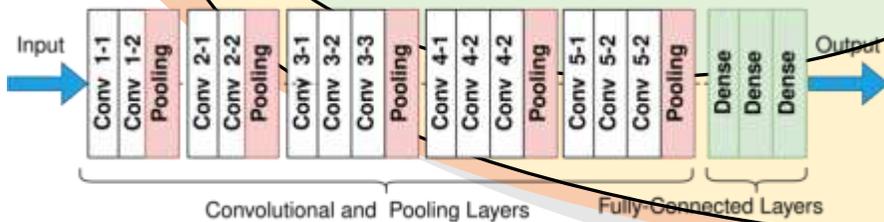
ディープラーニング

画像系
(画像認識, 画像生成)

CNN

GAN

VGG16 Model Architecture



(CNN派生VGGモデルの出典) <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VGG16.png>

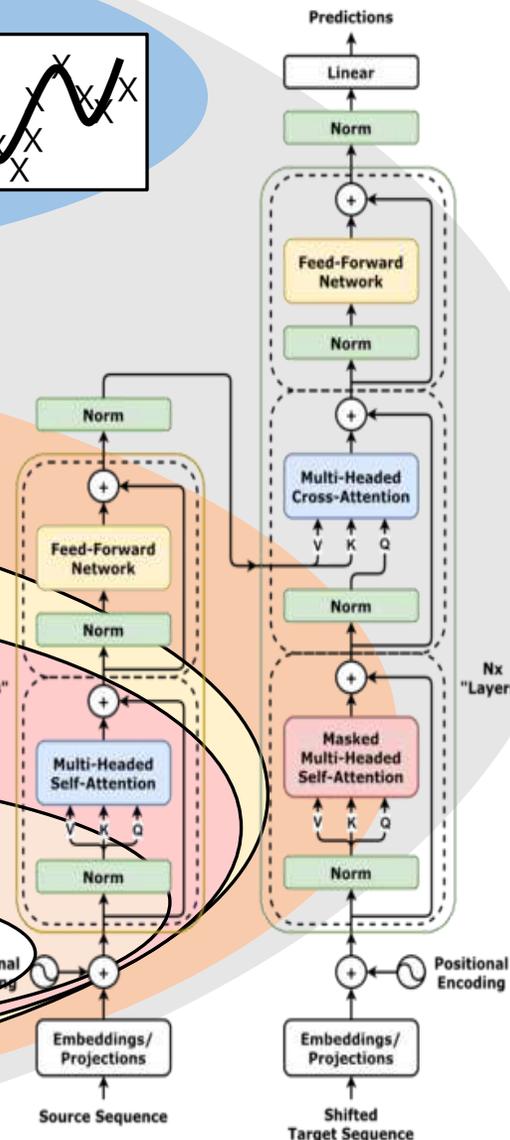
© 2025 Toshifumi Takei

自然言語処理系
(言語生成, 画像生成)

Transformer

GPT

DeepSeek



(Transformerモデルの出典) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transformer,_full_architecture.png

「量子ビット」に似ている？ … 神経細胞(ニューロン)

ヒトの脳は、百億～千億個もある **神経細胞** の巨大なネットワーク。
一つひとつの神経細胞は、**興奮すると電気信号を出す** 単純な機能

神経細胞 (ニューロン)

**興奮(活性化)
する/しない
二つの状態のみ**

他の細胞から

他の細胞へ

シナプス結合

細胞体 (電気信号を受けると、化学反応を起こして、他の細胞へ電気信号を送る)

各々の神経細胞は、**数万本のシナプス結合**している。
それぞれ、**シナプス結合の強さが異なる**

「イジングモデル」に似ている？ … ニューラルネット・モデル

1963年ノーベル生理学・医学賞
Hodgkin-Huxley方程式 (微分方程式)

神経細胞

シナプス結合

(結合の重みが異なる)

神経細胞

簡素化された
数理モデル化

神経細胞のネットワーク構造

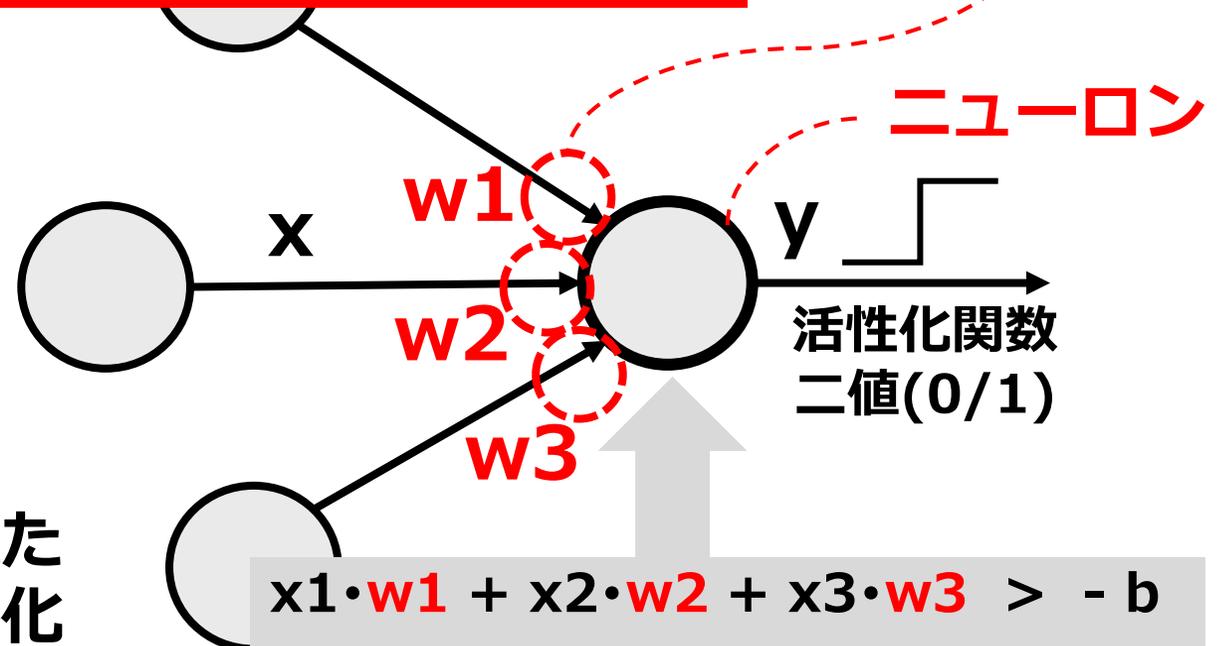
他の神経細胞群から膨大な情報が入力
⇒それを情報処理して出力するイメージ

特性を継承、超簡素化した数理モデル:
McCulloch & Pitts 形式ニューロン

隣接するニューロン間の
相互作用

シナプス結合
(結合の重み w)

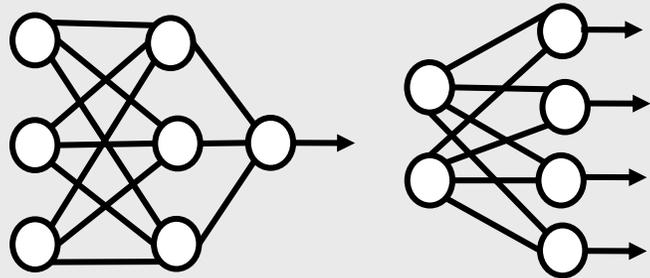
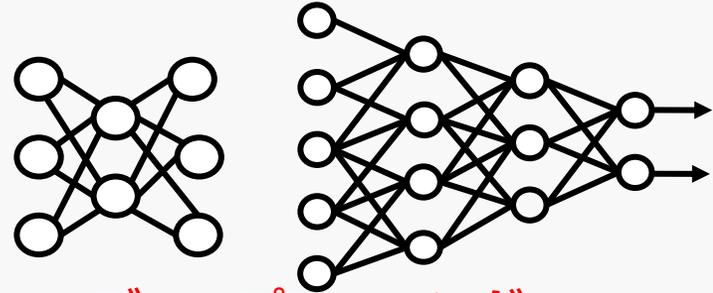
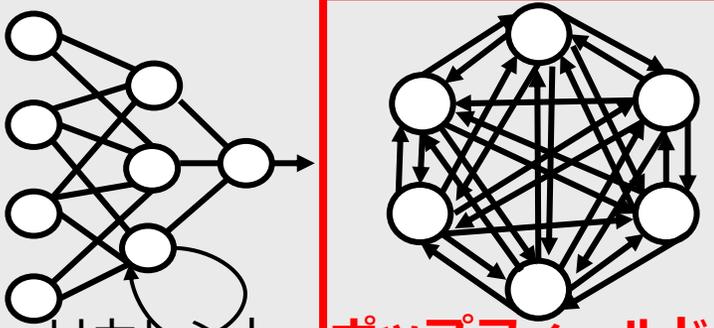
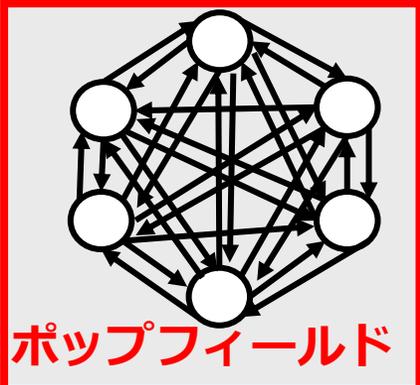
ニューロン



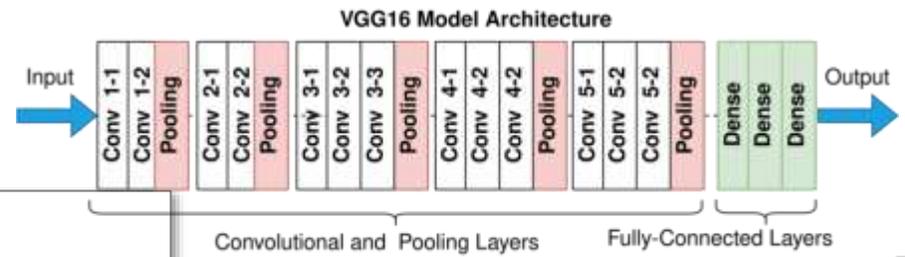
$x_1 \cdot w_1 + x_2 \cdot w_2 + x_3 \cdot w_3 > -b$
ならば、 $y=1$ を出力

ニューラルネット・モデル

ニューラルネット・モデルの元祖は **ポップフィールド**

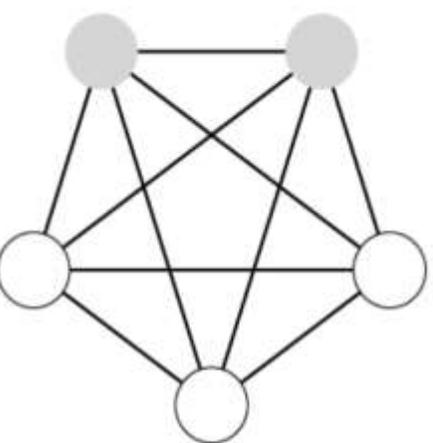
名称	ネットワーク構成 (イメージ)	能力	機能	機械学習 アルゴリズム
順伝播型 フィード フォワード	 <p>パーセプトロン SOM</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 順伝播 (信号：入力層→隠れ層→出力層)による学習 ・ 誤差逆伝播(誤差信号：出力層→隠れ層→入力層)による学習の効率化・高速化 ・ SOM:出力層の勝ちニューロン中心に結合の重み更新 	パーセプトロン: パターン認識 SOM: 競合学習(クラスタリング, 写像)	パーセプトロン (教師あり) SOM:自己組織化マップ (教師なし)
深層型 ディープ	 <p>ディープラーニング</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 深層：上の層のニューロン数を絞って少なくする ・ (順伝播型の特徴に加え)多層ニューラルネットにおいては、<u>情報を圧縮し、必要な特徴量のみ抽出</u> 	特徴量学習 (自己組織化, 次元削減) (画像やテキスト等から階層的に特徴量を抽出し, 認識/生成)	オートエンコーダ (教師なし) CNN Transformer (教師あり)
再帰型 リカレント	 <p>リカレント ポップフィールド</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ リカレント：深層ニューラルネットにおいて、<u>時間軸に沿っての学習を次々に実行</u> 	リカレント: 時系列分析 (動画, 機械翻訳, 言語生成)	RNN, LSTM (教師あり 深層+再帰)
全結合型 ホップ フィールド	 <p>ポップフィールド</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ ポップフィールド：各ニューロンの活性を 全エネルギー最小方向へ変化 	ポップフィールド: 組み合わせ最適化	ボルツマンマシン (教師なし)

ポップフィールド (ボルツマンマシン) ⇒ ディープラーニング ⇒ 現在のAI



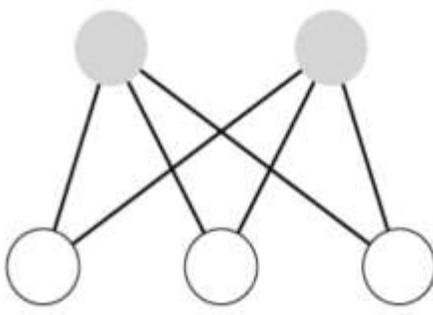
○ : 入力や出力 (可視ノード) ● : 内部処理 (隠れノード)

ボルツマン・マシン



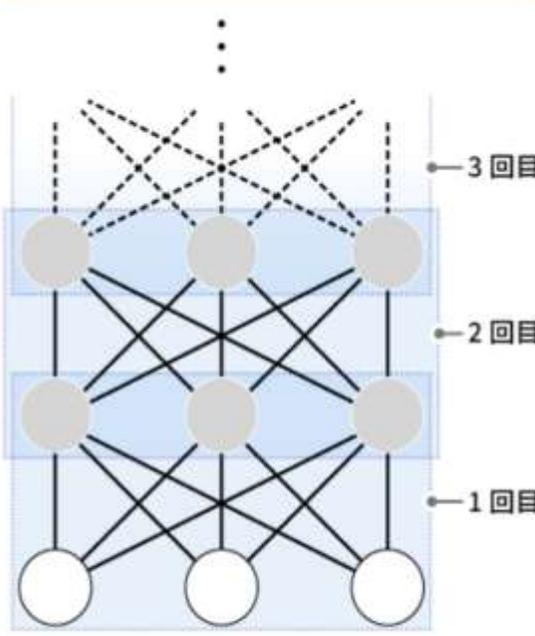
ボルツマン・マシンは、データを入力出力するニューロン(可視ノード)に、ネットワーク内部の計算だけに使うニューロン(隠れノード)を追加した

制限ボルツマン・マシン



制限ボルツマン・マシンは、可視ノードと隠れノードの間にだけ結合がある

2層分の学習を繰り返して多層に



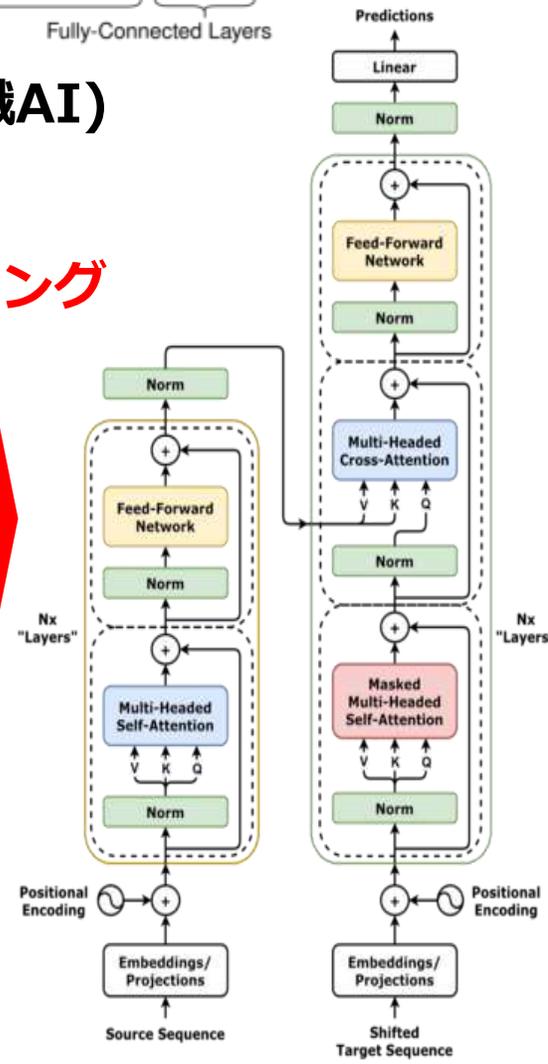
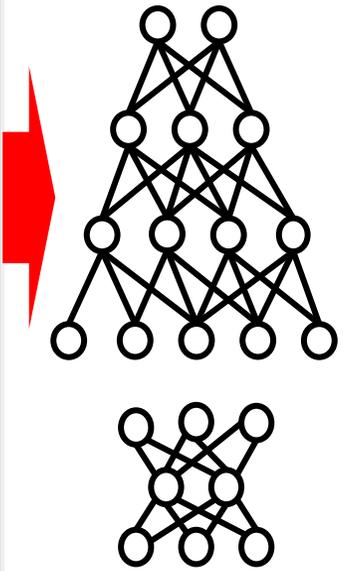
まず、可視ノードと隠れノードの間の結合を学習させ(図中の1回目)、次にその隠れノードと別の隠れノードの間の結合を学習させ(図中の2回目).....といった要領で、2層分に相当する学習を繰り返すことにより、多層の層から成るANNの学習が可能に

赤い矢印は著者が追加

ボルツマン・マシンを発展させた多層のANNで「深層学習」を実現する仕組みのイメージ

CNN (画像認識AI)

ディープラーニング



Transformer (生成AI)

生成AIの開発には膨大な計算資源による「機械学習」が必要！

超高速・大容量演算



膨大な計算資源

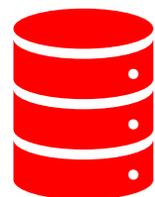
が必要となる

(ハイエンド GPU
例: NVIDIA H100)

数学, 化学, 医療
工業, 商業, 農業
Python等コーディング
作画, 作曲 など

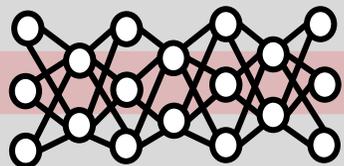
様々な分野

訓練データ



入力

モデル



順伝播

パラメータ: シナプス結合の重み w , 閾値 b

出力値

誤差関数

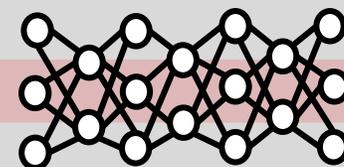
モデルのトレーニング
学習が収束するまで回す

パラメータ更新

(シナプス結合の重み w , 閾値 b)

誤差逆伝播

(バック・プロパゲーション)



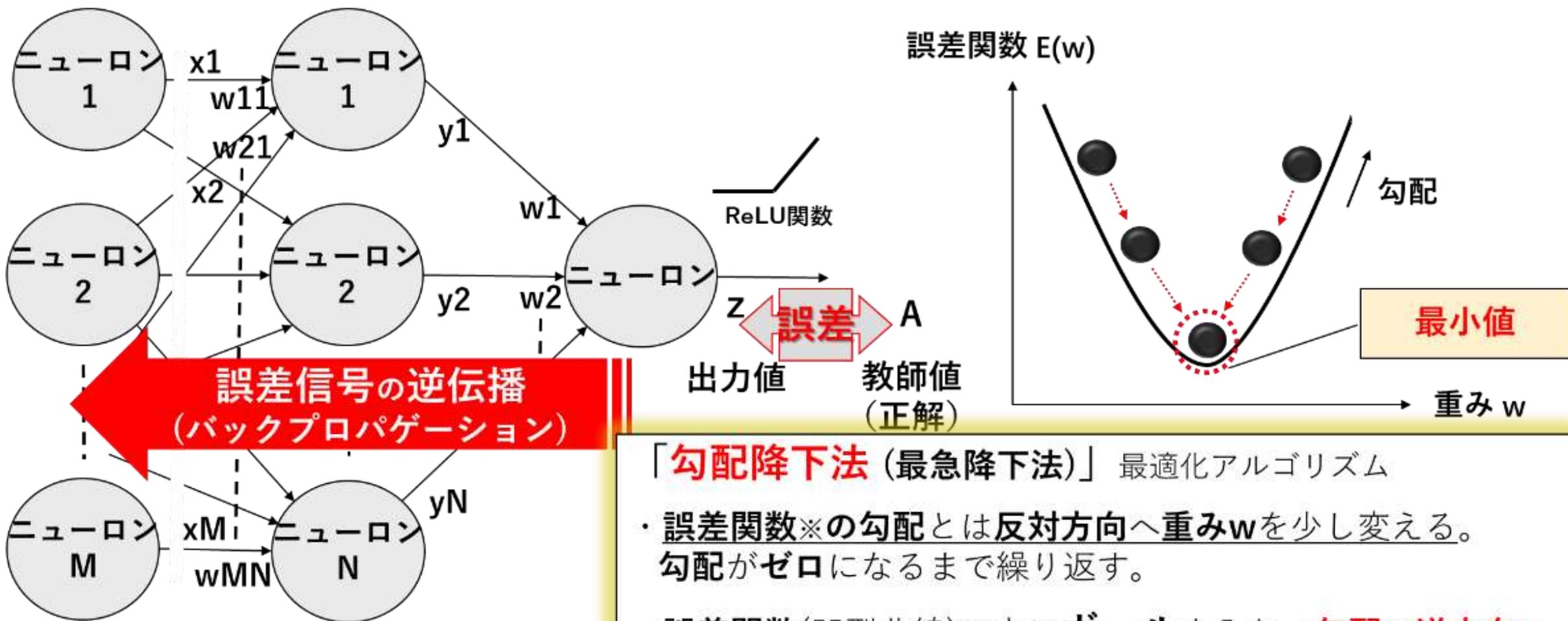
誤差

機械学習

OpenAI が開発した **GPT-4o**
パラメータ数: 推定 **100兆**

膨大な計算量

「アニーリング」に似ている？ … 誤差逆伝播の「勾配降下法」



誤差関数の勾配を利用して
誤差関数の「最小値」を
見つけるアルゴリズム

- 「勾配降下法 (最急降下法)」最適化アルゴリズム
- ・ 誤差関数※の勾配とは反対方向へ重み w を少し変える。勾配がゼロになるまで繰り返す。
 - ・ 誤差関数(凹型曲線)の中にボールを入れ、勾配の逆方向へボールを転がし、「最小値」(底)へ降下させていくイメージ
 - ・ 出力層から順次、入力層へ向かって w を変える 誤差信号が逆伝播 するかたち

「アニーリング」に似ている？ … 勾配降下法による「最適解」の探索

学習パラメータの「組み合わせ最適化問題」

(局所)最適解問題
機械学習の初期値によって局所解に陥る可能性

学習の誤差関数 $E(w)$
(正解との差)

初期値(悪)

初期値(良)

初期値(悪)
(データ不足, データ偏り等)

局所解

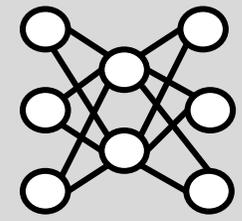
局所解 (最小値)

統計力学 (統計熱力学, 量子統計力学) のアニーリングと同じ

最適解 (本当の最小値)

学習のパラメータ w
(シナプス結合の重み)

凹(おう)型曲線



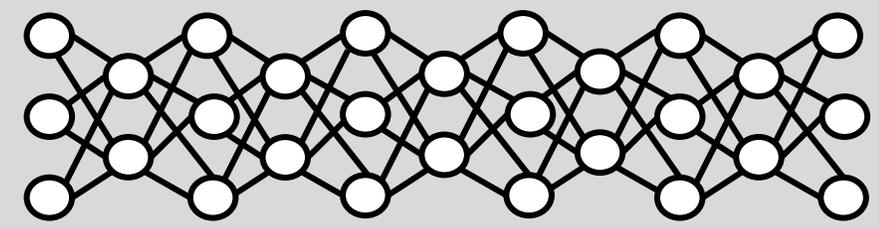
凹型曲線が 1つ

「局所解」がない



AIの性能・精度向上

ニューラルネットの深層化



凹型曲線が 複数

「局所解」が出現

AI の父 = **ヒントン博士** が「**ノーベル物理学賞**」を受賞！

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the **Nobel Prize in Physics 2024** to **John J. Hopfield** Princeton University, NJ, USA and **Geoffrey Hinton** University of Toronto, Canada. This year's two Nobel Laureates in Physics have used tools from physics to develop methods that are the foundation of today's powerful machine learning.

ジェフリー・ヒントン博士は、**物理学 (統計力学) の手法 (ポップフィールド博士のボルツマンマシン: イジングモデル に基づく エネルギー関数 を用いた 確率分布を近似する機械)** を使用し、今日の強力な **人工ニューラルネットワーク の 機械学習 の基礎**となる**手法**※を開発した。

※ **ボルツマンマシン**を深層化した **ディープラーニングの 誤差逆伝搬法による学習**

データの特徴量 (学習パラメータの組み合わせ最適解) を自律的に発見、特定の要素 (画像やテキスト) を**認識/生成**するタスクを実行できる手法を開発した。

引用元:

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2024/press-release/>

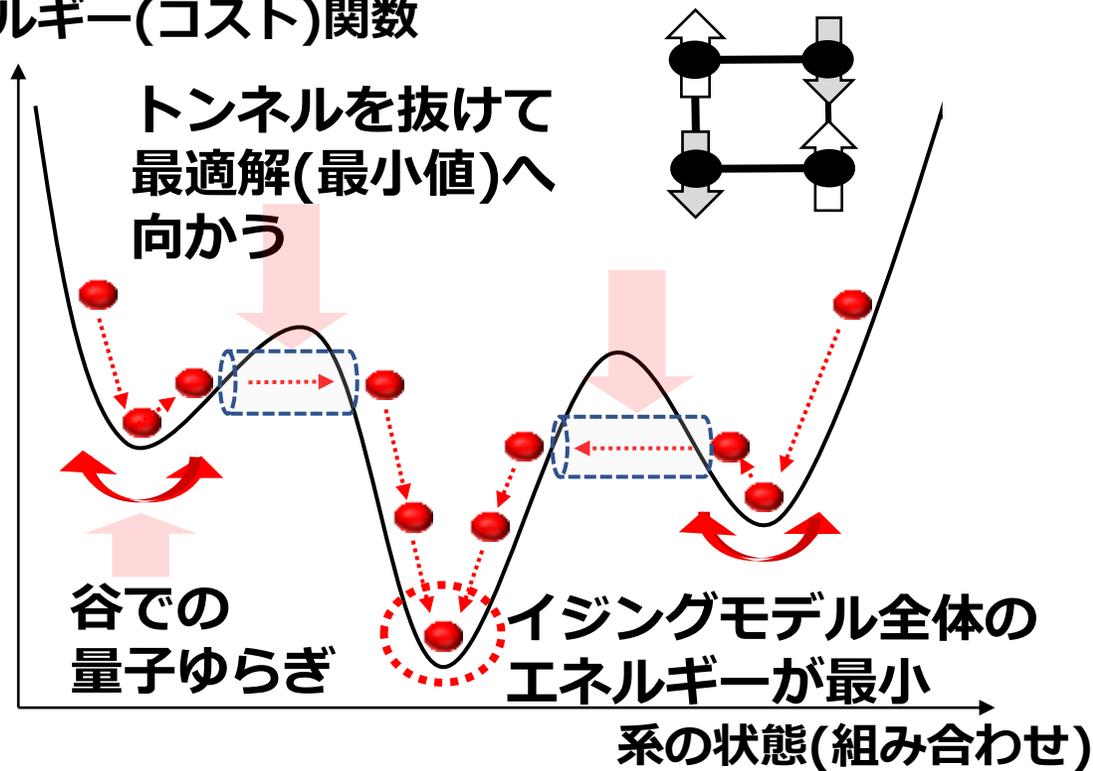
翻訳文に (補足説明) 追記



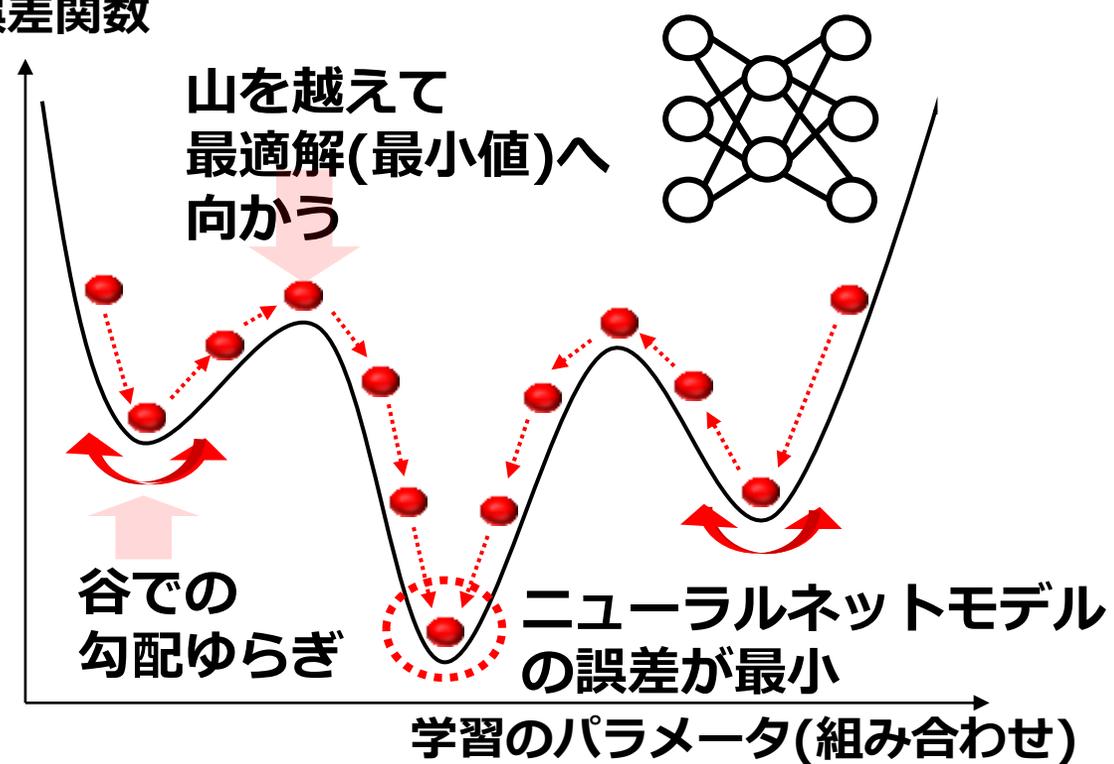
「量子コンピュータ(アニーリング)」と
 「AI (ディープラーニングの機械学習)」は
 統計力学 による「組み合わせ最適解の探索」
 という同じ基本原理的技術で動かしている！



エネルギー(コスト)関数



誤差関数



ご清聴、ありがとうございました！(了)