

組合せ最適化問題を高速求解する

量子インスパイアード技術「デジタルアニーラ」

【技術編】

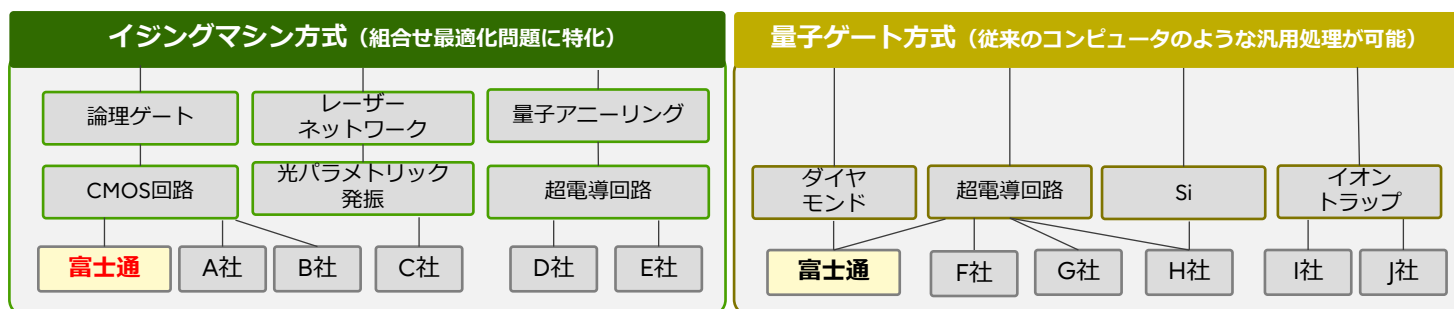
デジタルアニーラは、量子現象に着想を得たコンピューティング技術により、一般的なコンピュータでは解くことが難しい「組合せ最適化問題(*)」を短時間で解きます。

(注) 組合せ最適化問題

与えられた「組合せ」の中から、指定された条件を満たす「一番良い組合せ」を選び出す問題。有名な例は、各都市を必ず1回だけを通るという制約のもとで、距離が最小となる巡回ルート（最短経路）を見つける「巡回セールスマン問題」がある。

量子/量子Inspiredコンピュータの分類

動作原理の違いによりイジングマシン方式とゲート方式に分類され、デジタルアニーラはイジングマシン方式により組合せ最適化問題を求解。極低温や高真空は不要です。



イジングモデルによる組合せ最適化問題の求解

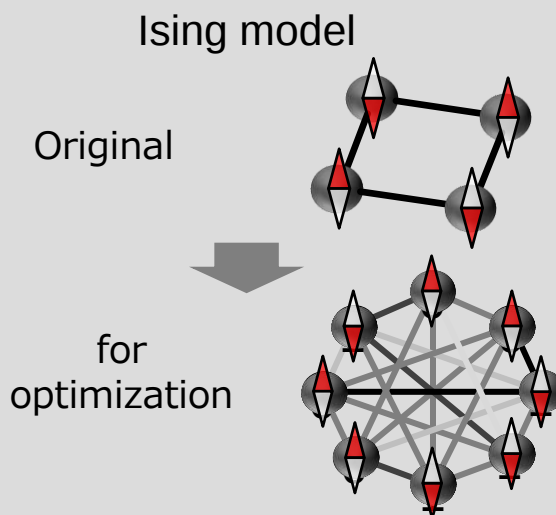
イジングモデルのスピン状態をバイナリー変数に変換した系のエネルギーを最小化する状態 X (基底状態)を探索

$$E(X) = - \sum_{i,j} W_{ij} x_i x_j - \sum_i b_i x_i$$

State $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N)$
 State variable of bit i $x_i \in \{0,1\}$

組合せ最適化問題をイジングモデルで扱うための3要素

- ✓ ビット数
- ✓ ビット間の結合度
- ✓ ビット間の結合強度階調

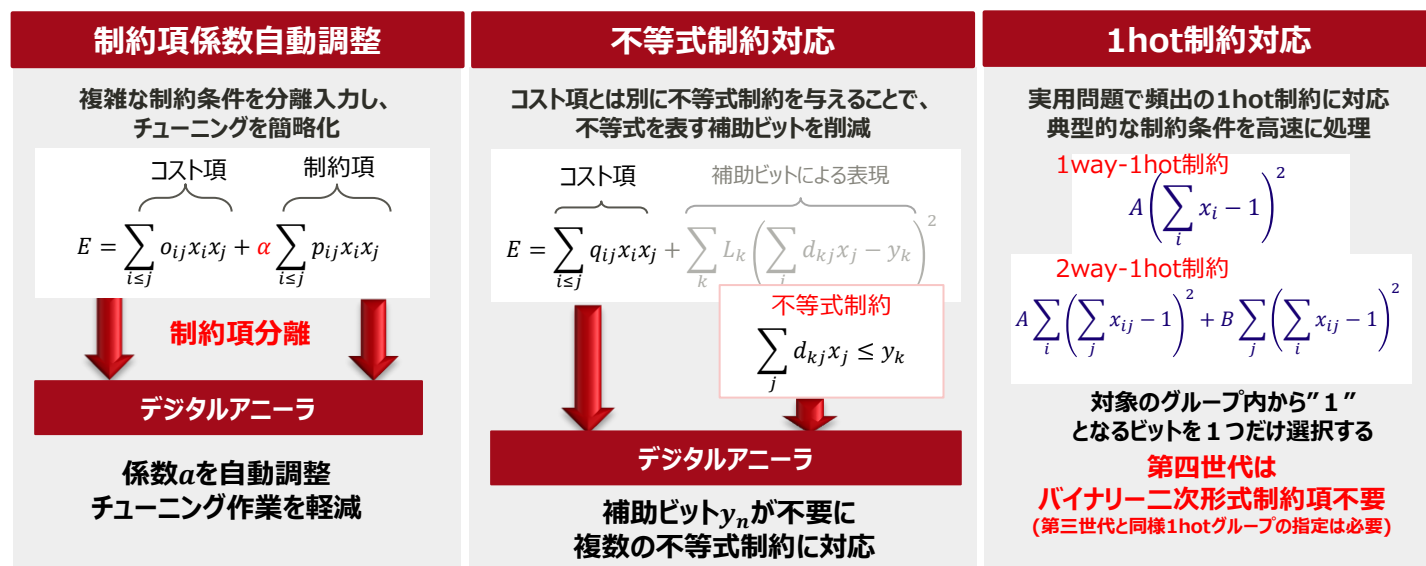


富士通のデジタルアニーラの特長

・大規模アニーリングコアにより、問題を分割することなく並列ビット処理を実行
 ・反転ビット選択時に制約条件を活用し、1,2way-1hot時にはそれぞれ2,4ビットを同時反転。

- | | |
|-------|-----------------|
| ① 規模 | 10万ビット規模で課題に対応 |
| ② 結合数 | ビット間全結合による使いやすさ |
| ③ 精度 | 64bit階調の高精度 |

利便性が向上したデジタルアニーラのAPI



デジタルアニーラ（第四世代）の特徴

第三世代の利便性はそのままに、
大規模アニーリングコアが最適解を高速に求解

①大規模問題を高速に求解

大規模アニーリングコア搭載(マルチGPU実装)により、第三世代比で最大10倍の高速化

②高い利便性

・第三世代の利便性を継承

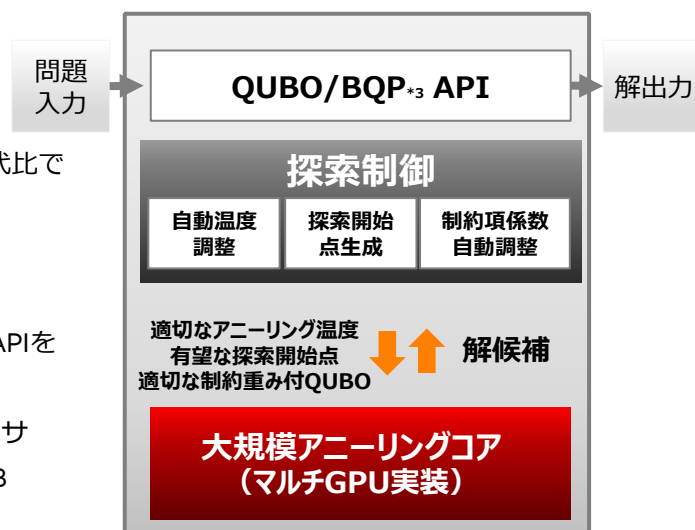
新たに1hot制約*1のバイナリー二次形式制約項化を不要とするAPIを追加し、入力データを削減、入力時の煩雑さを解消

・Azure BLOB Storage*2の利用により大規模問題の受け渡しをサポート 問題データサイズ増加：第三世代2GB→第四世代20GB

*1:スケジューリング問題などの実問題で頻出する制約条件のひとつ

*2:お客様で別途契約が必要

*3:BQP (Binary Quadratic Programming:バイナリー二次計画問題)



デジタルアニーラの求解性能

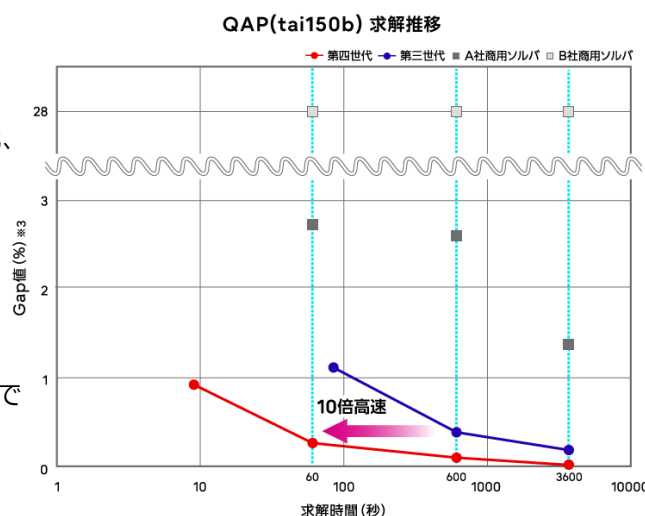
二次割当問題（QAP※1）で検証

大規模QAPインスタンスのひとつであるtai150b(※2)で、第四世代、第三世代デジタルアニーラのベンチマークを実施（問題サイズ22,500ビット）

第四世代は第三世代の**10分の1の時間**でより優れた解を導出。

（第四世代60秒、第三世代600秒で導出）

第四世代デジタルアニーラは、他社商用ソルバの400分の1の時間で優れた解を導出。（第三世代は84秒で導出）



※1 QAP : Quadratic Assignment Problem

※2 QAPLIB URL : <https://coral.ise.lehigh.edu/data-sets/qaplib/>

※3 Gap値が小さいほど優れた解で、Gap値0はこれまで知られている最良解 (BKS : Best Known Solutions) を示す。

デジタルアニーラに関する最新の技術解説資料と研究論文をご紹介します。

アーキテクチャ関連

解説：第三世代デジタルアニーラの技術	中山 寛ほか	-
Description : Third Generation Digital Annealer Technology	H. Nakayama et al.	-
Jump Markov chains and rejection-free Metropolis algorithms	J. S. Rosenthal et al.	
3-Regular 3-XORSAT Planted Solutions Benchmark of Classical and Quantum Heuristic Optimizers	M.Kowalsky et al.	arXiv,2021
Replica Exchange MCMC Hardware With Automatic Temperature Selection and Parallel Trial	K. Dabiri et al.	IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020
A Hamiltonian Engine for Radiotherapy Optimization	M. Malekmohammadi et al.	EMBC2020
A Permutational Boltzmann Machine with Parallel Tempering for Solving Combinatorial Optimization Problems	M. Bagherbeik et al.	PPSN2020

応用関連

Innovation in planning Space Debris removal missions using Artificial Intelligence and Quantum-inspired computing	D. Snelling et al.	8th European Conference on Space Debris, 2021
組合せ最適化問題を超高速に解くデジタルアニーラの材料開発・創薬への応用	大淵 真理ほか	応用物理 90巻(2021)8号
Market Graph Clustering via QUBO and Digital Annealing	S. W. Hong et al.	J. Risk Financial Manag., 2021
Optimization of the composition in a composite material for microelectronics application using the Ising model	Y. Imanaka et al.	Scientific Reports, 2021Scientific Reports, 2021
Tackling the Challenge of a Huge Materials Science Search Space with Quantum-Inspired Annealing	K. Hatakeyama-Sato et al.	Adv. Intell. Syst., 2021
アミノ酸間相互作用ポテンシャルにおける光学異性体の影響	寺島千絵子ほか	Journal of Computer Chemistry, Japan 19巻(2020)4号
An Ising Framework for Constrained Clustering on Special Purpose Hardware	E. Cohen et al.	CPAIOR2020
Angle of Arrival and Time of Flight Estimation as an Ising Energy Minimization Problem	S. Han et al.	PIMRC2020
Graph Distances and Clustering	P. Miasnikof et al.	arXiv, 2020arXiv, 2020
Distances on a Graph	P. Miasnikof et al.	COMPLEX NETWORKS 2020
Regularizing Neural Networks by Stochastically Training Layer Ensembles	A. Labach et al.	MLSP2020
A Framework for Neural Network Pruning Using Gibbs Distributions	A. Labach et al.	GLOBECOM2020
Fast hierarchical coordination using price signal for town-scale home-EMSs aggregation with digital annealer	T. Saito et al.	ECOS2020
Combinatorial Optimization-based Hierarchical Management of Residential Energy Systems as Virtual Power Plant	T. Saito et al.	SICE2020

デジタルアニーラに関する最新の技術解説資料と研究論文をご紹介します。

応用関連

Tackling the challenge of a huge materials science search space with quantum-inspired annealing	K. Hatakeyama-Sato et al.	arXiv, 2020
Optimization of Planar Magnet Array Using Digital Annealer	A. Maruo et al.	IEEE Transactions on Magnetics, 2020
デジタルアニーラの原理と材料開発への応用	實宝秀幸ほか	表面と真空 63巻(2020)3号
Design Optimization of Coils and Magnets in Vibration Energy Harvester Using Digital Annealer	A. Maruo et al.	CEFC2020
Materials informatics approach for design of Si/Ge layered nanostructures with low thermal conductivity	N. Takahashi et al.	Japanese Journal of Applied Physics, 2020
Optimization of a Heterogeneous Ternary Li3PO4-Li3BO3-Li2SO4 Mixture for Li-Ion Conductivity by Machine Learning	K. Homma et al.	The Journal of Physical Chemistry C, 2020
Alchemical free energy calculations via metadynamics: Application to the theophylline-RNA aptamer complex	Y. Tanida et al.	Journal of Computational Chemistry, 2020
Digital Annealer for quadratic unconstrained binary optimization: a comparative performance analysis	O. Şeker et al.	arXiv, 2020
Routing and Wavelength Assignment with Protection: A Quadratic Unconstrained Binary Optimization Approach	O. Şeker et al.	arXiv, 2020
Real-Time Periodic Advertisement Recommendation Optimization using Ising Machine	F. Mo et al.	2020 IEEE Big Data
Digitally Annealed Solution for the Vertex Cover Problem with Application in Cyber Security	M. Javad-Kalbasi et al.	ICASSP2019
Ising Model Formulation of Outlier Rejection, with Application in WiFi Based Positioning	M. T. Rahman et al.	ICASSP2019
Ising-dropout: A Regularization Method for Training and Compression of Deep Neural Networks	H. Salehinejad et al.	ICASSP2019
Digitally Annealed Solution for the Maximum Clique Problem with Critical Application in Cellular V2X	Z. Naghsh et al.	ICC2019
Enhancing Medical Imaging Semantic Segmentation Using the Digital Annealer	J. Wang et al.	DSW2019
From Whole to Parts: Medical Imaging Semantic Segmentation with Very Imbalanced Data	J. Wang et al.	GLOBECOM2019
Ising Dropout with Node Grouping for Training and Compression of Deep Neural Networks	H. Salehinejad et al.	GlobalSIP2019
デジタルアニーラ 実用レベルの組合せ最適化問題を高速に解く専用ハードウェア	實宝秀幸	応用物理 88巻(2019)6号
デジタルアニーラを用いた混合冷媒の熱物性最適化	塩賀健司ほか	日本機械学会 熱工学コンファレンス2019
Graph Classification of Molecules Using Force Field Atom and Bond Types	H. Jippo et al.	Molecular Informatics, 2019

お問い合わせ先

製品・サービスについてのお問い合わせは[コチラ](#)

富士通株式会社 〒211-8588 神奈川県川崎市中原区上小田中4-1-1

