

# Computing Platforms

## 高速解決組合最佳化問題的 富士通量子啟發數位退火計算解決方案 【技術篇】

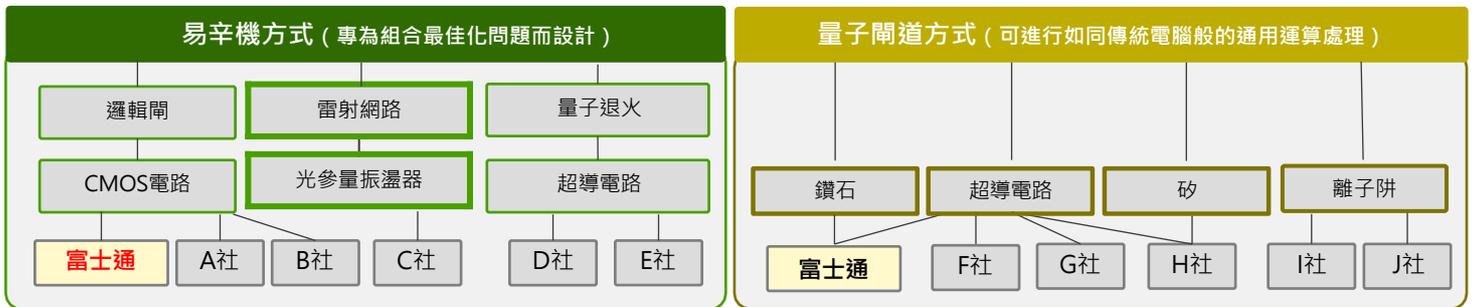
富士通數位退火器 ( Digital Annealer ) 運用源自量子現象的運算技術理念，能夠在極短時間內計算出一般電腦難以處理的「組合最佳化問題 ( 註1 ) 」。

( 註 ) 組合最佳化問題

在眾多組合中，找出符合限制條件的「最佳組合」之問題。例如，在「每個城市只能造訪一次」的限制條件下，規劃出總成本最小或總距離最小的最佳或最短路徑的旅行推銷員問題 ( Travelling Salesman Problem ) 。

### 量子 / 量子啟發式電腦的分類

依據運作原理的不同，可分為易辛機 ( Ising Machine ) 方式與量子閘道 ( Gate ) 方式。  
富士通數位退火器採用易辛機方式來解組合最佳化問題，不需要極低溫或高真空環境即可運作。



### 易辛模型解組合最佳化問題

透過搜尋由易辛模型自旋狀態轉換為二元變數後之系統，其能量最小化的狀態 X ( 基態 )

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

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

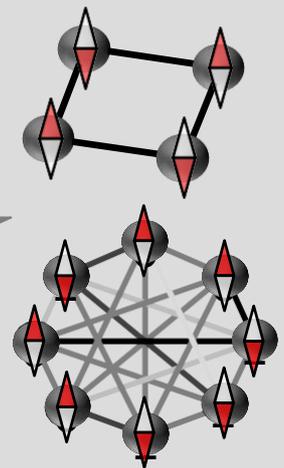
易辛模型處理組合最佳化問題的三大要素

- ✓ 位元數量
- ✓ 位元之間的連結度
- ✓ 位元之間的連結強度階層

#### 易辛模型

原始狀態

用於最佳化

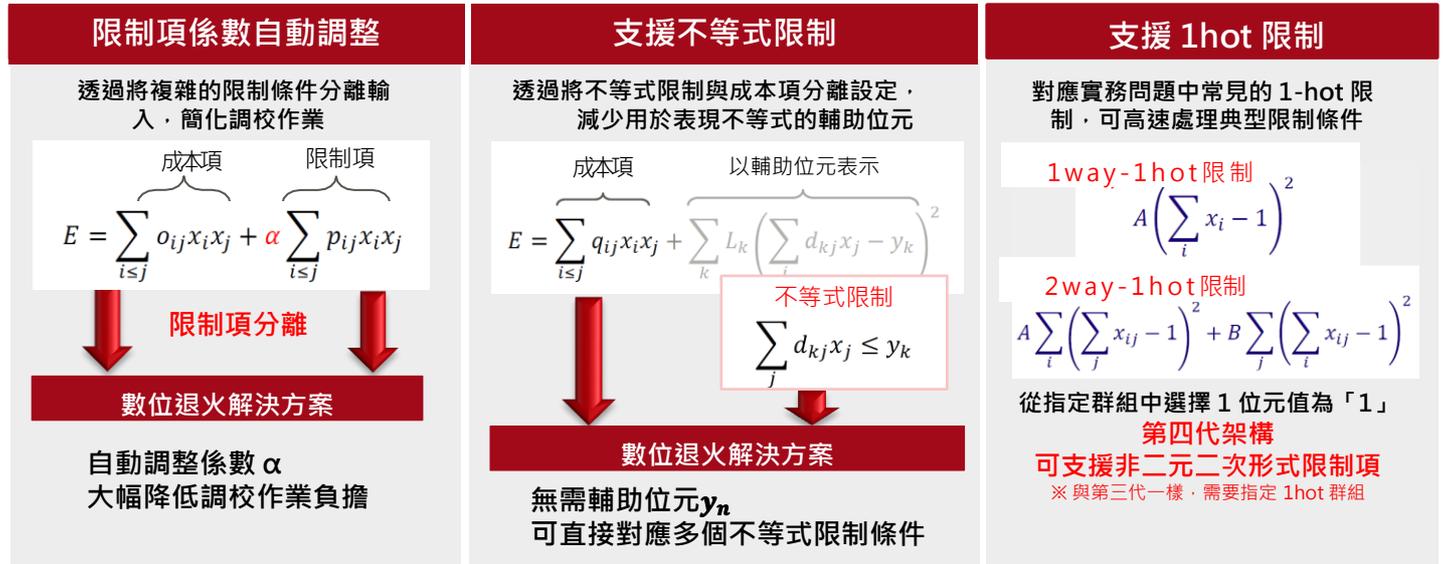


### 富士通數位退火解決方案的特色

- 採用大型退火核心 ( Annealing Core ) 無需分割問題即可進行平行位元處理。
- 於選擇反轉位元時活用限制條件，在 1way 或 2way-1hot 條件下，分別可同時反轉 2 個或 4 個位元。

- 1 大規模 支援 10 萬位元規模的問題處理
- 2 全連結 採用位元間全連結架構
- 3 高精度 支援 64 位元階層的高精度表現

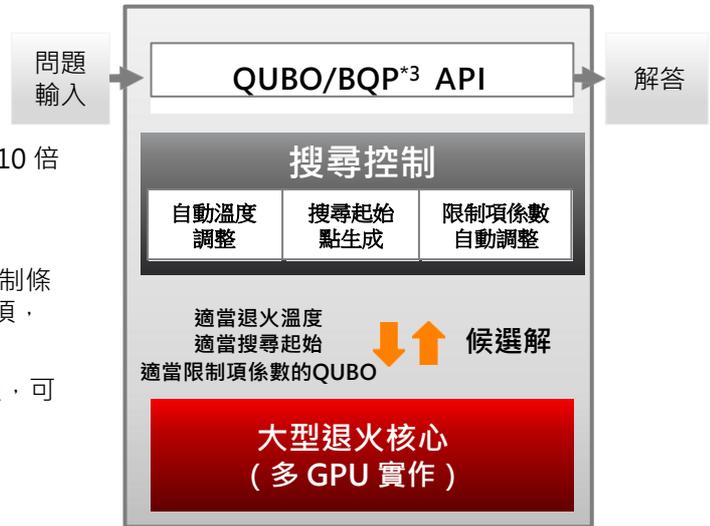
# 便利性大幅提升的數位退火解決方案 API



## 數位退火器 (第四代) 的特色

在延續第三代高便利性的基礎上  
透過大型退火核心實現最佳解的高速求解

- 大規模問題的高速解答
  - 搭載大型退火核心 (多 GPU 實作)，相較第三代，最高可達 10 倍的效能提升
- 高便利性
  - 完整承襲第三代的使用便利性，新增 API，無需再將 1-hot 限制條件\*1 轉換為二元二次形式 (Binary Quadratic Form) 的限制項，可有效減少輸入資料量，並降低建模與輸入時的複雜度
  - 透過 Azure Blob Storage\*2 支援大規模問題資料的傳遞與處理，可處理的問題資料容量提升：第三代：2GB → 第四代：20GB



\*1：諸如排程問題等實務應用中經常出現的限制條件之一

\*2：需由客戶另行簽訂相關服務合約

\*3：BQP ( Binary Quadratic Programming : 二元二次規劃問題 )

## 數位退火技術解決難題效能

### 二次指派問題 ( QAP\*1 ) 進行效能驗證

本測試選用大規模 QAP 實例之一 tai150b\*2 針對第四代與第三代數位退火技術進行效能基準測試 (問題規模：22,500 位元)。

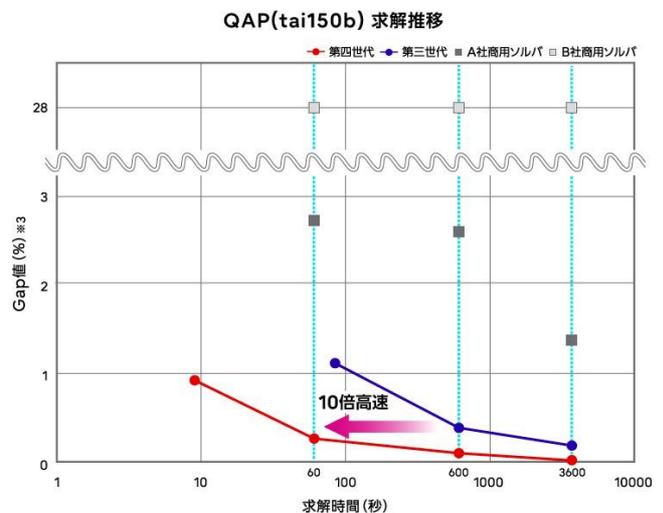
第四代數位退火技術僅需第三代 1/10 的時間，即可導出品質更佳的解。(第四代耗時 60 秒，第三代耗時 600 秒)

與其他商業求解技術相比，第四代數位退火技術可在約 1/400 的時間內導出更優異的解。(第三代為 84 秒)

※ 1：二次指派問題 QAP: Quadratic Assignment Problem

※ 2：QAPLIB 參考資料庫: <https://coral.ise.lehigh.edu/data-sets/qaplib/>

※ 3：Gap 值越小代表解的品質越佳；Gap 值為 0 表示已達目前已知的最佳解 (BKS : Best Known Solutions)



在此介紹與量子啟發式數位退火技術相關的**最新技術解説資料與研究論文**。

## 架構相關

<a href="#">解説：第三世代デジタルアニーラの技術</a>	<a href="#">中山 寛ほか</a>	二
<a href="#">Description : Third Generation Digital Annealer Technology</a>	<a href="#">H. Nakayama et al.</a>	二
<a href="#">Jump Markov chains and rejection-free Metropolis algorithms</a>	<a href="#">J. S. Rosenthal et al.</a>	
<a href="#">3-Regular 3-XORSAT Planted Solutions Benchmark of Classical and Quantum Heuristic Optimizers</a>	<a href="#">M.Kowalsky et al.</a>	<a href="#">arXiv,2021</a>
<a href="#">Replica Exchange MCMC Hardware With Automatic Temperature Selection and Parallel Trial</a>	<a href="#">K. Dabiri et al.</a>	<a href="#">IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020</a>
<a href="#">A Hamiltonian Engine for Radiotherapy Optimization</a>	<a href="#">M. Malekmohammadi et al.</a>	<a href="#">EMBC2020</a>
<a href="#">A Permutational Boltzmann Machine with Parallel Tempering for Solving Combinatorial Optimization Problems</a>	<a href="#">M. Bagherbeik et al.</a>	<a href="#">PPSN2020</a>

## 應用相關

<a href="#">Innovation in planning Space Debris removal missions using Artificial Intelligence and Quantum-inspired computing</a>	<a href="#">D. Snelling et al.</a>	<a href="#">8th European Conference on Space Debris, 2021</a>
<a href="#">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</a>	<a href="#">大淵 真理ほか</a>	<a href="#">応用物理 90巻(2021)8号</a>
<a href="#">Market Graph Clustering via QUBO and Digital Annealing</a>	<a href="#">S. W. Hong et al.</a>	<a href="#">J. Risk Financial Manag., 2021</a>
<a href="#">Optimization of the composition in a composite material for microelectronics application using the Ising model</a>	<a href="#">Y. Imanaka et al.</a>	<a href="#">Scientific Reports, 2021Scientific Reports, 2021</a>
<a href="#">Tackling the Challenge of a Huge Materials Science Search Space with Quantum-Inspired Annealing</a>	<a href="#">K. Hatakeyama-Sato et al.</a>	<a href="#">Adv. Intell. Syst., 2021</a>
<a href="#">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</a>	<a href="#">寺島千絵子ほか</a>	<a href="#">Journal of Computer Chemistry, Japan 19巻(2020)4号</a>
<a href="#">An Ising Framework for Constrained Clustering on Special Purpose Hardware</a>	<a href="#">E. Cohen et al.</a>	<a href="#">CPAIOR2020</a>
<a href="#">Angle of Arrival and Time of Flight Estimation as an Ising Energy Minimization Problem</a>	<a href="#">S. Han et al.</a>	<a href="#">PIMRC2020</a>
<a href="#">Graph Distances and Clustering</a>	<a href="#">P. Miasnikof et al.</a>	<a href="#">arXiv, 2020arXiv, 2020</a>
<a href="#">Distances on a Graph</a>	<a href="#">P. Miasnikof et al.</a>	<a href="#">COMPLEX NETWORKS 2020</a>
<a href="#">Regularizing Neural Networks by Stochastically Training Layer Ensembles</a>	<a href="#">A. Labach et al.</a>	<a href="#">MLSP2020</a>
<a href="#">A Framework for Neural Network Pruning Using Gibbs Distributions</a>	<a href="#">A. Labach et al.</a>	<a href="#">GLOBECOM2020</a>
<a href="#">Fast hierarchical coordination using price signal for town-scale home-EMSs aggregation with digital annealer</a>	<a href="#">T. Saito et al.</a>	<a href="#">ECOS2020</a>
<a href="#">Combinatorial Optimization-based Hierarchical Management of Residential Energy Systems as Virtual Power Plant</a>	<a href="#">T. Saito et al.</a>	<a href="#">SICE2020</a>

在此介紹與量子啟發式數位退火技術相關的**最新技術解說資料與研究論文**。

## 應用相關

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

## 聯繫方式

台灣富士通股份有限公司  
TEL : +886-2-2311-2255  
E-mail : infoTW@fujitsu.com

