

ナチュラルコンピューティングを用いた新型計算機の開発

伊藤 光樹、齋藤 孝成、白樫 淳一

国立大学法人 東京農工大学大学院 工学研究院

1. 組み合わせ最適化問題ってなに？

最適化問題 → 条件を満たす解の中で一番よいものを求める問題

入力パラメータの増加 ⇒ 組み合わせの爆発的増加 (NP困難)

例) 巡回セールスマン問題 (TSP)

すべての都市を一度ずつ巡り、出発地に戻る経路で移動コストが最小のものを求めるもの

訪問経路が爆発的に増加
(訪問数 - 1)!

伊藤お勤めパリ近郊の美味しいチーズ屋さんマップ

ツール・ド・フランス2013のコース上の都市巡り

1 × 10³⁸ 経路

パリ市内の美術館巡り

3 × 10⁹ 経路



14箇所訪問

6 × 10¹⁶ 経路



20箇所訪問



35箇所訪問

訪問箇所の増加

2. TSPをスーパーコンピュータで解けるのか？

大規模で高度な計算を処理『スーパーコンピュータ: 京』

1秒間に1京(10,000,000,000,000,000)回の超高速計算が可能

得意: コンピュータシミュレーション (気象, 創薬 etc.)

35都市のTSPを解こうとすると...

1 × 10³⁸ 経路を全て単純計算する

※演算回数 = 経路数 × 都市数 ⇒ 10³⁹回の演算が必要だとすると

1秒間に1京回の計算でも1京年もかかる

4. 我がが行っている研究 “イジングコンピューティングを用いた組み合わせ最適化問題の検討”

物理現象のシミュレートを用いた最適解の探索

磁性体の格子模型である “Ising Model” を用いたコンピューティング

不安定状態

2次元のスピングラス

安定状態



Annealing

温度を徐々に冷やす

↑ 外部磁場

↑ アップスピン

↓ ダウンスピン

違う方向に向く

↑ ↑

↑ ↑

同じ方向に向く

↑ ↑

↑ ↑

論理回路で表現

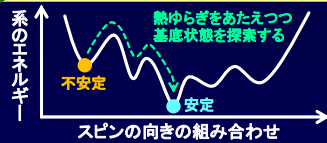
実数での表現 → デジタル表現 “0” が “1”

求めたい問題を “Ising Model” にマッピングしてシミュレーションを行う

ハミルトニアン H への定式化

$$H = - \sum_{\langle i, j \rangle} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i$$

スピン状態: σ_i 相互作用係数: J_{ij} 外部磁場: h_i



シミュレーションの結果が組み合わせ最適化問題の最適/近似解となる

50 × 50セルの最大カット問題

“木”が浮かび上がるように設定

t = 92 msec t = 182 msec t = 271 msec t = 360 msec

t = 449 msec t = 537 msec t = 626 msec t = 714 msec

温度を徐々に下げながら基底状態を探索

22500パターンから最適解を714ミリ秒で判定

約2.4億通りから最短経路の探索が可能

13都市のTSP

都市間の距離をJに写像

シミュレーション結果

経路長 = 154

約2.4億通りから最短経路の探索が可能

約2.4億通りから最短経路の探索が可能

約2.4億通りから最短経路の探索が可能

“Ising Model” のシミュレーションにより最適解の探索が可能

✓ 実際の自然現象を利用したナチュラルコンピューティングの実現を目指す

3. 組み合わせ最適化問題を解くためには？

ナチュラルコンピューティング

粘菌コンピュータ

自然現象の収束動作を利用した計算方法

組み合わせ最適化問題

問題を自然現象にマッピング

自然現象の収束動作

収束結果の観察

最適解/近似解

粘菌の習性を計算に応用

7mm

Atsushi Tero et al. Science 327 (2010) 439.

首都圏の効率的な交通網モデル

超伝導イジング

→ 量子アニーリング

による解の探索

絶対零度に近い

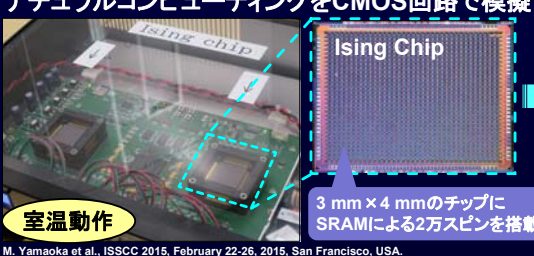
超低温での稼働

M. W. Johnson et al. Nature 473 (2011) 194.

S. Boixo et al. Nature Phys. 10 (2014) 218.

CMOSイジングコンピューティング

ナチュラルコンピューティングをCMOS回路で模倣



室温動作

M. Yamaoka et al., ISCC 2015, February 22-26, 2015, San Francisco, USA.

現在の半導体プロセスでの作製が可能

最大カット問題

初期状態

5 msec

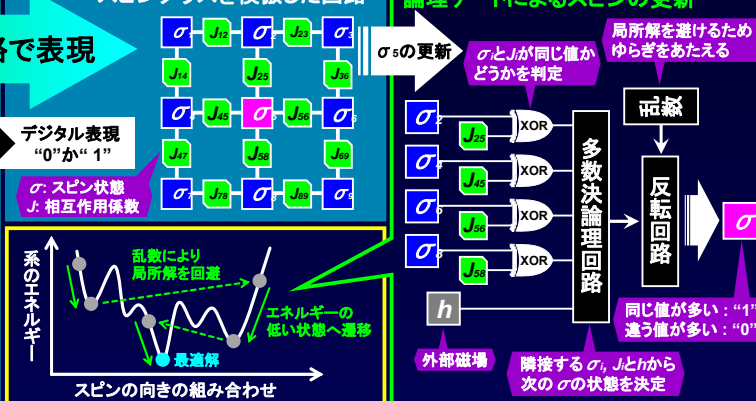
10 msec

論理ゲートを用いた “Ising” 計算機

デジタル回路を用いて “Ising Model” を模倣したコンピューティング

スピングラスを模倣した回路

論理ゲートによるスピンの更新



論理ゲートを用いたこの計算手法をソフトウェア上にエミュレートした

9 × 9セルの最大カット問題

“H” が最小エネルギーとなるようにJを設定

乱数の頻度を減らしながら最適解の探索を実行

局所解を回避し最適解に到達

Energy H (arb. unit)

Iteration

H = -35 H = -63 H = -83 H = -191 H = -205

“Ising” 計算機の組み合わせ最適化問題への適用が可能

✓ より効率的な論理表現の検討と “Ising” 計算機のハードウェア化を目指す