

# イジングマシンのメモリ外部化による小型化とマイコンとの協調動作

二木 大輝<sup>†</sup> 遠藤 あかり<sup>†</sup> 河原 尊之<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京理科大学工学部電気工学科

## 1. はじめに

組合せ最適化問題の近似解を効率的に導出するため、イジングモデルとして表した最適化問題の求解を行う半導体イジングマシンの研究が盛んに行われている。

本稿においては、全てのスピン間での相互作用を考慮した全結合型のイジングモデルの計算機能部分とメモリ機能部分の一部について 0.6 $\mu\text{m}$  CMOS プロセスの半導体チップ上に実装を行った。またその他の機能を実装した Arduino を用いチップとの協調動作を確認した。

## 2. 全結合型イジングモデル

2 つの配位状態を取るスピンを格子点上に配置したイジングモデルでのスピン  $i$  に関するエネルギーについて次の関係が成り立つ [1]。

$$E_i = -\sigma_i \left( \sum_j J_{ij} \sigma_j - h_i \right) = -\sigma_i \Delta E_i \quad (1)$$

また、任意のスピンの更新は、以下のようにできる。

$$\sigma_i = -\text{sgn}(\Delta E_i \pm T) \quad (2)$$

上式における  $T$  の符号は 2 値乱数により決定され、従来の疑似アニーリングより簡素化されている。

## 3. 回路構造

チップと Arduino との協調動作を考え、図 1 に示すアーキテクチャを採用した。

イジングマシン系は基本的な構成として、スピン値、相互作用値、外場値を格納する 3 種のレジスタ、レジスタに格納した値を用い式(2)の計算を行う積和加算器、疑似乱数発生器、温度計算器の 6 つから成る。

この内、相互作用値を格納するレジスタはスピン数の二乗に比例しサイズが大きくなる。本チップではこのレジスタの内計算に必要な一部のみをチップ内に実装し、計算過程に応じて順次外部にある大規模メモリから値を入力することでレジスタ部分の面積削減を行った。

また、積和加算器に関してツリー型の構造を採用し、1 クロックでの計算を可能とした。

イジングマシン系としての動作は以下ようになる。

始めに初期化動作として、Arduino から初期スピン値をチップに入力する。次にスピンの更新作業に入る。

スピンの更新作業では、まず更新するスピンに関する相互作用値をチップに入力する。チップはこの値から  $\Delta E$  の値の計算を行い出力する。Arduino は出力された  $\Delta E$  値に乱数と温度値の積を加算し、その符号を用い次のスピン値を決定する。決定されたスピン値はチ

ップへ入力されチップ内部のスピンレジスタが更新される。一定回数のスピン更新の後温度が更新される。

以下、上記の更新動作を温度が一定以下になるまで繰り返す。これによりスピンの配位状態が安定し、イジングモデルで表された問題の解が得られる。

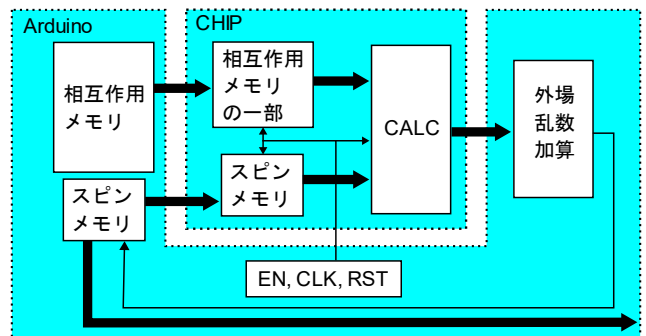


図1. イジングマシン系アーキテクチャ

## 4. チップへの実装

本稿においては、上記で説明したイジングマシン計算回路をフェニテックセミコンダクター株式会社の CMOS シャトルサービスを利用し実装した。図 2 が実装したチップである。

実装でのベンチマークとして、作成したチップと Arduino Mega 2560 を用い 4 都市での巡回セールスマン問題を解き、厳密解と一致することを確認した。

また、各周波数における動作時消費電力を測定した。図 3 が周波数と消費電力のグラフである。

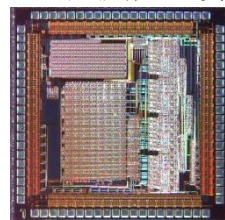


図2. チップ写真

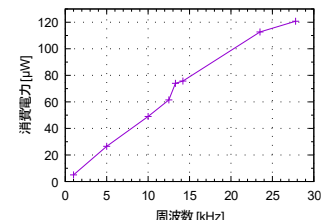


図3. 周波数と消費電力の関係

## 5. むすび

16 ビット全結合型イジングマシンの計算回路部のチップ化を 0.6 $\mu\text{m}$  CMOS プロセス上に行い外部のメモリ、外乱機能を実装した Arduino との協調動作を確認した。

今後、今回 Arduino 上に実装した機能に関するチップ化、イジングマシンチップの高集積化、高速動作可能性について検討を行いイジングマシンの改良を目指す。

## 参考文献

- [1] S. Kitamura, R. Iimura and T. Kawahara, 2020 IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 2020, pp. 319-324