

アニーリングマシンによる感染症伝播のシミュレーション

清水美卯 (指導教員: 工藤和恵)

1 はじめに

人類は紀元前の昔からさまざまな感染症の流行に悩まされてきた。原因も治療法も確立されていなかった時代には、大きな影響が及んだ。医療技術が発達した現在でも未だに全ての問題を克服できているとは言い難い。以前には知られていなかった新たな感染症である新興感染症が問題となっており、今日でも感染症は人々にとっての大きな脅威である。2020年現在、猛威を振るっている新型コロナウイルス感染症では流行地域が急速に拡大し、感染者数は1億人超、215万人もの死者が報告されるなど全世界で大きな懸念となっている。そのため、感染症の流行を未然に防ぐため、ふるまいをシミュレーションによって再現し予測することはその対策を考える上で有意義である。

本研究では、量子を使わず半導体回路を用いてイジングモデルを模擬するCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) アニーリングマシンを用いて、パーコレーション理論に基づいた人と人のつながり、免疫の有無を考慮した、ネットワーク上の感染の広がりをシミュレーションし、観察した。

2 方法

2.1 CMOS アニーリングマシン

CMOS アニーリングマシンは、組合せ最適化問題を高速に処理することができる非ノイマン型コンピュータである。問題を解くために従来のコンピュータは、その問題に応じて解くアルゴリズムを考え、逐次的な命令列を実行していく。それに対して、非ノイマン型コンピュータでは、解きたい問題を何らかの現象に対応づけし、その現象を用いて問題を解く。アニーリングマシンでは問題をイジングモデルと呼ばれる統計物理学のモデルで記述し、最適状態を探し出すためにアニーリングと呼ばれる動作を行う。局所解に陥り、エネルギーが低い状態を探索することが困難な状況が起こることがよくある。そこから脱出するために、確率的な動作によってなるべく低いエネルギーの状態を探索する動作を、イジングモデルの構造を模したハードウェアで実現するマシンがCMOS アニーリングマシンである [1]。

2.2 パーコレーション

不規則に分布した要素間に何らかのものが伝達され得るときにそれらの要素間につながりが生じると考えると、つながりがパーコレートしているかどうかによってその分布を特徴づけることができ、つながり方の違いから性質の変化を理解することができる。パーコレーションは、このようなつながりが主要な働きをする系の取り扱い方を与えるものである。つながりによって形成される集合の解析や生じた集合の特徴がどのようにネットワークの性質に反映されるかを調べる [2]。

感染症について考えると、ネットワークの性質を決める人のつながりがネットワーク全体に広がっている。

感染症の広がりや人のつながりに依存しているため、つながりについて考える必要がある。

2.3 モデル

人を正方格子状に並べ、相互作用 (人と人のつながり) はある割合でしか存在しない場合を考える。頂点 i, j をつなぐリンクを (i, j) と表し、リンクの集合を E とすると、対応するイジングモデルのハミルトニアンは次のように書ける。

$$H = -J \sum_{(i,j) \in E} s_i s_j + \sum_i h_i s_i \quad (1)$$

J は格子間相互作用、 h_i は局所磁場に対応するパラメータを示す。変数 s_i, s_j は、頂点 i, j が感染していたかどうかを表し、感染していたときは $s_i = 1$ 、感染していなかったときは $s_i = -1$ とする。このとき、時間の概念がないため、式 (1) を最小化することで得られるのは、感染が収束した後に感染していたかどうかの最終状態である。格子間相互作用は $J > 0$ で、感染力に対応する。局所磁場は $h_i = \pm h$ であり、感染のしやすさを示す。

右辺第1項は、隣接頂点が感染していれば感染しやすく、そうでなければ感染しにくいという効果を表している。

右辺第2項は、周りにつながっていない場合の感染しやすさを表して、 $h_i > 0$ のときは感染しにくく、 $h_i < 0$ のときは感染しやすい。

2.4 ネットワークの設定

一辺あたりの格子点の個数が $N_x = 20$ 、 $N_y = 20$ で、 $N_x N_y = 400$ 個の正方格子を用意する。人と人のつながりを疑似的に表現するために、正方格子の辺に強磁性相互作用を割合 p_1 で定義する。このとき隣接格子点は、割合 p_1 でつながる。例えば、 $p_1 = 0.5$ の時、つながりを表すネットワークは図1のようになる。

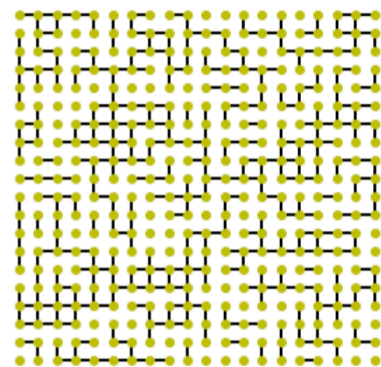


図1: 人と人のつながり ($p_1 = 0.5$ の場合)。黄色は人を、線はつながりを表している。

3 実行結果

免疫を持つ人の割合を p_2 とすると、局所磁場 h_i は割合 p_2 で $h_i > 0$ 、割合 $1 - p_2$ で $h_i < 0$ となる。ネットワークの中央を最初の感染者として固定し、例として、 $h = 0.5$, $p_1 = 0.5$, $p_2 = 0.9$ とした場合を図 2, $h = 1.5$, $p_1 = 0.7$, $p_2 = 0.4$ とした場合を図 3 に示す。このとき、黄色の格子点は感染していなかった人を、赤い格子点は感染していた人を表している。

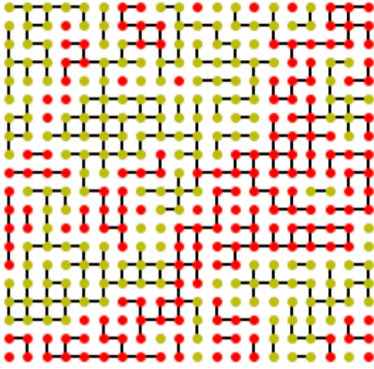


図 2: $h = 0.5$, $p_1 = 0.5$, $p_2 = 0.9$ の場合の感染の広がり

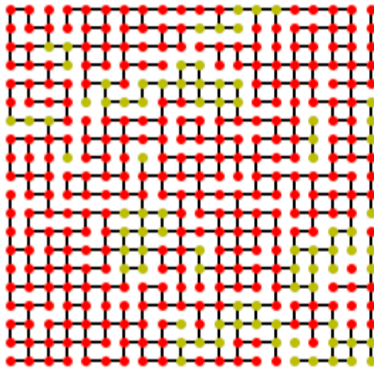


図 3: $h = 1.5$, $p_1 = 0.7$, $p_2 = 0.4$ の場合の感染の広がり

感染の広がりを数値で評価するため、蔓延率 R を次のように定義する。

$$R = \frac{1}{N_x N_y} \sum_i \frac{s_i + 1}{2} \quad (2)$$

R は、 $0 \leq R \leq 1$ であり、感染が全く広がらなかったとき $R = 0$ 、蔓延したとき $R = 1$ となる。

式 (1) の格子間相互作用を示すパラメタ $J = 1.0$ に固定し、局所磁場を表すパラメタ $h = 0.5$, $h = 1.0$, $h = 1.5$, $h = 2.0$ にそれぞれ設定したときに、 p_1 , p_2 を 0.1 から 0.9 までの間を 0.1 間隔で変化させ、網羅的にシミュレーションを行なった。 R , p_1 , p_2 のカラーマップを描画し、その結果を図 4 に示す。

縦軸の p_1 はつながりを持つ割合、横軸の p_2 は免疫を持つ割合である。色は R の値を示していて、 $R = 1$ のときは赤となり感染は蔓延、 $R = 0$ のときは紫となり感染は広がらない。 $h = 0.5$ の図を見ると、 p_1 が大きく

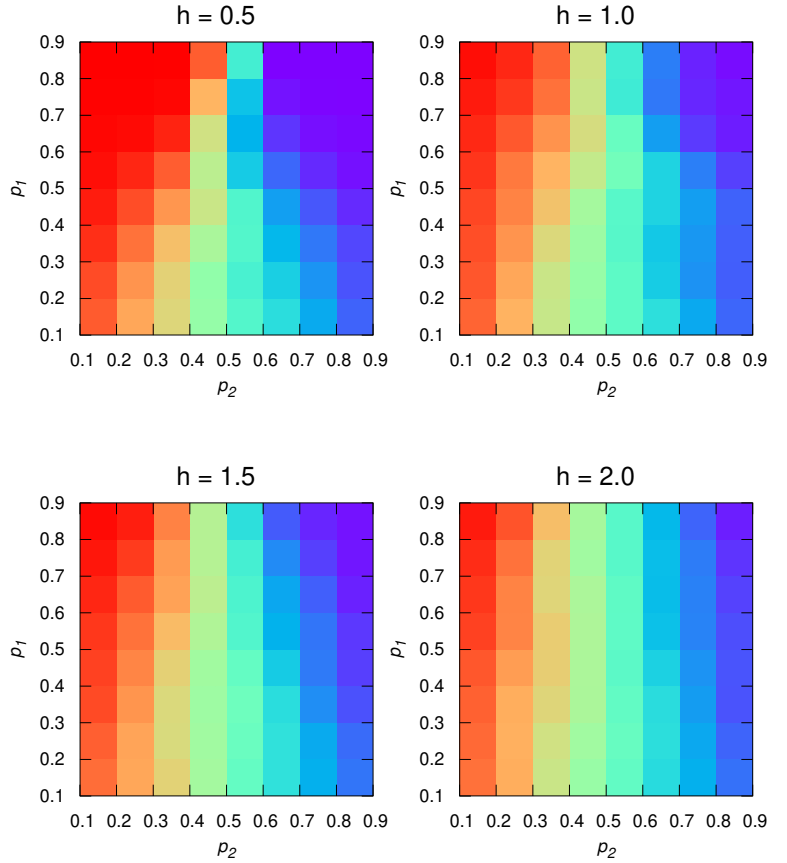


図 4: 蔓延率 R ($R = 1$ のとき赤、 $R = 0$ のとき紫)。

なると R も大きくなり、 p_2 が大きくなると R は小さくなっている。これはつながっている割合が高いほど広がり、免疫を持っている割合が高いほど広がらないということである。 p_1 , p_2 と R の相関関係は、 $p_1 - R$ 間は弱く、 $p_2 - R$ 間は強い。つまり、感染の広がりは免疫を持つ人の割合により強く依存している。 $h = 2.0$ のときの図を見ると、同様に p_2 と R の強い相関関係が確認できるが、 p_1 と R の相関は $h = 0.5$ と比べると弱くなっている。

4 まとめ

本研究では、ネットワーク内での接触と免疫の有無を考慮して感染の広がりをアニーリングマシンを用いてシミュレーションした。その結果は、感染症の蔓延は人々の接触よりも免疫の有無に左右されると解釈できる。 今後はより具体的なシチュエーションでのシミュレーションを行い、どのような影響が出るかを調べる必要があると考えた。 感染症の広がりを防ぐために取られうる、感染者を隔離し、感染者との接触を減らすという対策を実装したい。

参考文献

- [1] HITACHI, 「CMOS アニーリングの顧客適用に向けた量子コンピュータ技術の応用」, <https://www.hitachihyoron.com/jp/archive/2020s/2020/03/03b09/index.html> (2021).
- [2] 小田垣 孝, 「パーコレーションの科学」, 裳華房