

量子アニーリングを用いた 医師配置最適化シミュレーション

○川口 英明¹

¹東京大学医学部附属病院

第1回量子ソフトウェア研究発表会

COI開示・倫理審査

演題名：量子アニーリングを用いた医師配置最適化シミュレーション
演者名：川口英明

本研究は、JSPS科研費JP20K14979の助成を受けたものです。

本研究は、東京大学大学院医学系研究科・医学部倫理委員会の承認
(2020年6月26日 審査番号：2020086NI) を得ています。

本発表の参考文献番号は研究報告に対応しています。

背景·目的

背景

- 近年、日本の医師数は増加傾向であり、将来推計の結果や政策的な背景から、今後も総医師数は増え続けると予測されている
- 医師数を増やしても医師の地理的偏在は改善されないことが知られており[9, 10]、喫緊の課題は**医師の地理的偏在**である
- 医師数に偏在が生じた場合、日本のフリーアクセス可能な医療提供体制の崩壊につながり得るため、医師数をはじめとした医療資源の適正配置は社会的なニーズが高い問題である

これまでの研究状況

- 医療資源の地理的偏在が生じた場合、日本の医療提供体制の崩壊につながり、各地域の健康格差が生じる可能性
 - 精神科医がいる市区町村はそうでない市区町村に比べ自殺率が有意に低い[2]
 - 急性心筋梗塞の地域死亡率に冠動脈CTといった医療機器の配置が関連[3]
- これまでの研究は現状分析に留まっており、実データに則した最適配置を直接的に算出した研究報告はほとんどない
- **実データに則した医師最適配置の提示**が実施できれば、より直接的に政策立案支援に資すると期待

医師配置最適化と組合せ最適化問題

- 医師配置最適化は、**制約条件付き組合せ最適化問題**と捉えられる
 - (1)各地域の医師数になるべく均等になるように増やすべき地域を割り当てる
 - (2)公平性の観点からは、医師数を重点的に増やす地域が集中し過ぎないように、地域間の隣接関係を制約条件として考慮する必要
- 医師配置最適化問題を制約条件付き組合せ最適化問題と捉え、実データを用いたハミルトニアンを設計すれば、量子アニーリングで現状を反映した医師配置最適化シミュレーションを行えるのではないか

本研究の概要

- 組合せ最適化問題の中でも、地図の塗り分け問題に着目し、東京都を対象に、医師数を増やす優先順位を示す色を割り当てる
- 医師数の実データと、空間統計学的手法で処理して得られた東京都の地理空間情報を用いてハミルトニアンを設計する
- シミュレーテッドアニーリングと量子アニーリングを実行し、医師の最適配置を示す色塗り分け地図を作成し、その評価を行う

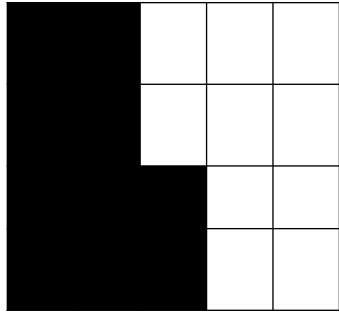
空間統計について

空間統計

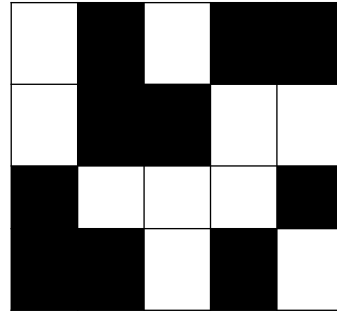
- 位置座標を持ったデータに関する統計学的手法で、地域差の分析など、地理的情報を加味したデータ分析手法として知られている
- データの空間的な側面を利用し、統計分析を高度化し、信頼性を向上させようと試みる点に特徴がある
- 空間データの特徴として、距離が近ければ近いほど、事物の性質が似るという**空間的自己相関**が挙げられる

空間的自己相関

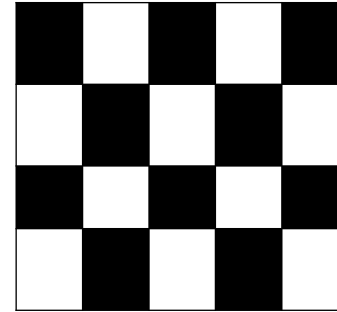
- 距離が近いほど物事の性質が似るという性質



正の自己相関



相関なし

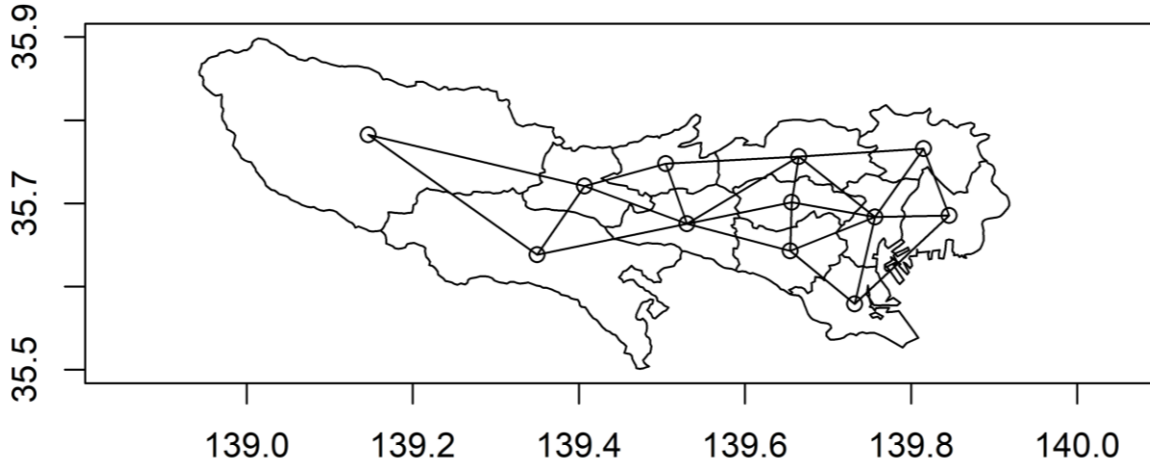


負の自己相関

例) 地価データでは、周囲の地域の不動産の価格を参照しながら評価するため、空間的自己相関が発生する

- 隣接情報を**空間重み行列**にして、空間的自己相関をモデル化する
 - 空間的な集積性を調べるためのモラン統計量やJoin count統計量の算出

隣接関係の定義と空間重み行列



東京都(島嶼除く)の12の二次医療圏

※二次医療圏とは、各地域に必要な医療資源量を考慮するための行政区分であり、複数の市区町村から構成される

- 各二次医療圏の幾何学的重心をノード、地域境界の有無でエッジを定義
- 緯度・経度を用いて各エッジ間の大円距離を算出し、その逆数の二乗を重みとする空間重み行列を作成
 - ー 距離が遠いとその分重みが小さくなる
- 行列の全要素の和で各要素を割り、空間重み行列を標準化

方法

研究デザインと使用データ

- 組合せ最適化問題のうち、地図の塗り分け問題として定式化
- **医師増加優先順位を表す4色**を、東京都(島嶼除く)の12の二次医療圏に塗り分ける
 - 優先順位が高い、比較的高い、比較的低い、低い
- 医師数は2018年度の医師歯科医師薬剤師調査のデータを、人口は2015年度の国勢調査のデータをそれぞれ政府統計の総合窓口からダウンロード
- 各二次医療圏の人口1000人当たりの医師数を算出し、データとして使用
- 医師数データと空間重み行列を用いてハミルトニアンを設計

ハミルトニアン設計

- 医師数が集中し過ぎないように地域間の隣接関係を制約条件にしつつ、各地域の医師数が均等になるよう、各二次医療圏に色を割り当てる
- 合計**3項から成るハミルトニアン**を設計
 - (1)各二次医療圏に確実に1色を割り当てる制約項
 - (2)医師数データを用い各二次医療圏の医師数を均等にするためのコスト項
 - (3)空間重み行列を用い、隣接する二次医療圏間でなるべく違う色にするためのコスト項
- **隣接関係の考慮の有無**で使用するハミルトニアンを分け、結果を比較
 - (a)隣接関係を考慮して最適化する場合のハミルトニアンは、(1)(2)(3)のすべての和
 - (b)隣接関係を考慮せずに最適化する場合のハミルトニアンは、(1)(2)の和

(1)各二次医療圏に1色を割り当てる制約項

- 地図の塗り分け問題として成立するため、各二次医療圏に割り当てる色が必ず1色となる条件項をハミルトニアンAとして設定

$$H_A = \sum_{v=1}^{12} \left(1 - \sum_{i=1}^4 x_{vi}\right)^2$$

- v が二次医療圏の数(12)、 i が色の数(4)、 x は0-1変数である。

(2)医師数を均等にするためのコスト項

- 医師数データを用い、各二次医療圏の医師数を均等にするためのコスト項をハミルトニアンBとして設定

$$H_B = \sum_{i=1}^4 \sum_{v=1}^{12} P_i (DOC_v^{second} - DOC^{Median}) x_{v,i}$$

- DOCsecondは各二次医療圏の人口1000人対医師数、DOCMedianはその中央値
- Pはペナルティ項を表し、医師を増やす優先順位を表す色に付与された重みであり、優先順位が高い順に4、3、2、1の値を付与

(3)隣接二次医療圏を異なる色にするコスト項

- 空間重み行列を用い、隣接する二次医療圏間でなるべく違う色にするためのコスト項をハミルトニアンCとして設定

$$\begin{aligned} H_C = & \sum_{i=1,4} \sum_{u,v \in E} W_{u,v} x_{v,i} x_{u,i} \\ & + \sum_{i=2,3} \sum_{u,v \in E} W_{u,v} x_{v,i} x_{u,i} \\ & + \sum_{i=1,3} \sum_{u,v \in E} W_{u,v} x_{v,i} x_{u,i+1} \\ & + \sum_{i=2,4} \sum_{u,v \in E} W_{u,v} x_{v,i} x_{u,i-1} \end{aligned}$$

- Wが空間重み行列、Eが二次医療圏間のエッジ
- 隣接条件に応じて比重を変えられるよう、隣接条件ごとに分割して設計したが、本研究では簡便のため全ての隣接条件が等しい比重とした

シミュレーションの実行

- D-Waveマシンを用いた量子アニーリングとシミュレーテッドアニーリングを、**隣接関係の考慮の有無で場合分けして実行**し、結果を比較
 - (a)第3項を含むハミルトニアンを用いて隣接関係を考慮する場合
 - (b)第3項を含まないハミルトニアンを用いて隣接関係を考慮しない場合
- 量子アニーリング、シミュレーテッドアニーリングを、共にそれぞれ10000回サンプリングし、ハミルトニアンが最低の時の解を、組合せ最適解とした
- ハミルトニアンをQUBO形式で表現する際には、PyQUBOを用いた

空間的自己相関の評価

- 塗り分け図の空間的自己相関の程度を調べ、どの程度色がばらつきを有しているか評価するため、**モラン統計量**と**Join Count統計量**を算出
- モラン統計量は、空間的自己相関の有無に関する指標であり、値が1に近いときは正の自己相関の存在を示唆し、逆に-1に近いときは負の自己相関の存在を示唆する
- Join Count統計量を用いることで、モラン統計量より詳細に、各色の空間的凝集性を統計学的に評価する

結果と考察

ハミルトニアンと比較

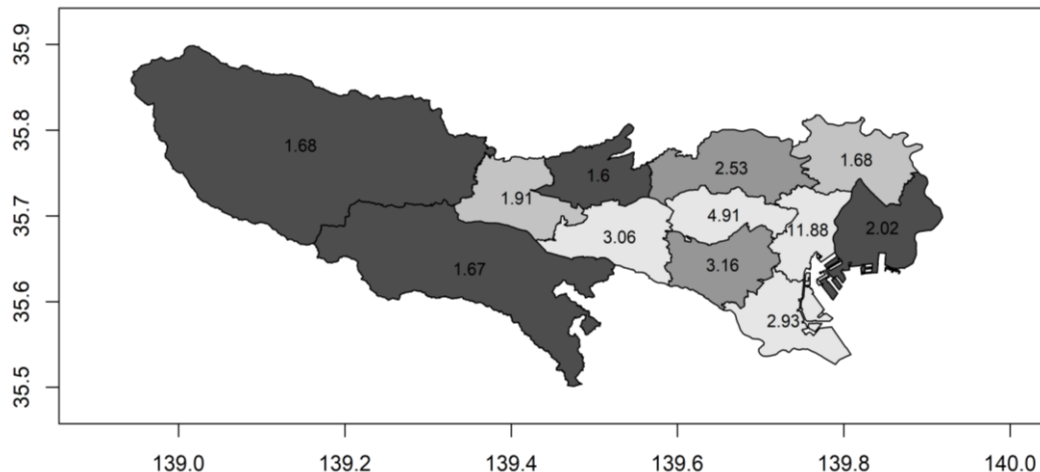
表 10000回サンプリング中のハミルトニアン最低値

	シミュレーテッドアニーリング	量子アニーリング
(a) 隣接の考慮あり	1.988	2.021
(b) 隣接の考慮なし	0.088	0.099

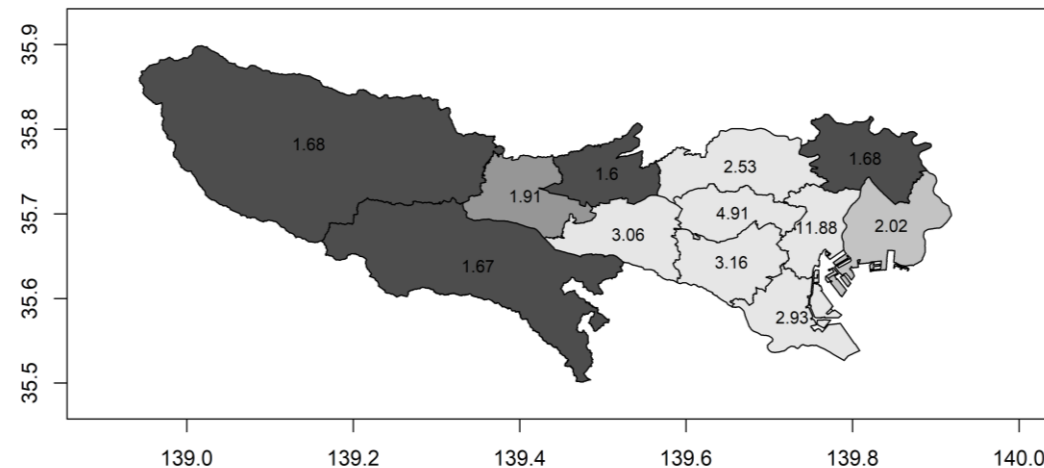
- シミュレーテッドアニーリングと量子アニーリングをそれぞれ10000回サンプリングした
- (a)第3項を含むハミルトニアンを用いて隣接関係を考慮する場合、(b)第3項を含まないハミルトニアンを用いて隣接関係を考慮しない場合、**どちらの場合でも、シミュレーテッドアニーリングの方が量子アニーリングよりも低いハミルトニアン値を提示**

塗分け図：シミュレーテッドアニーリング

(a)第3項を含み隣接関係を考慮する場合



(b)第3項を含まず隣接関係を考慮しない場合

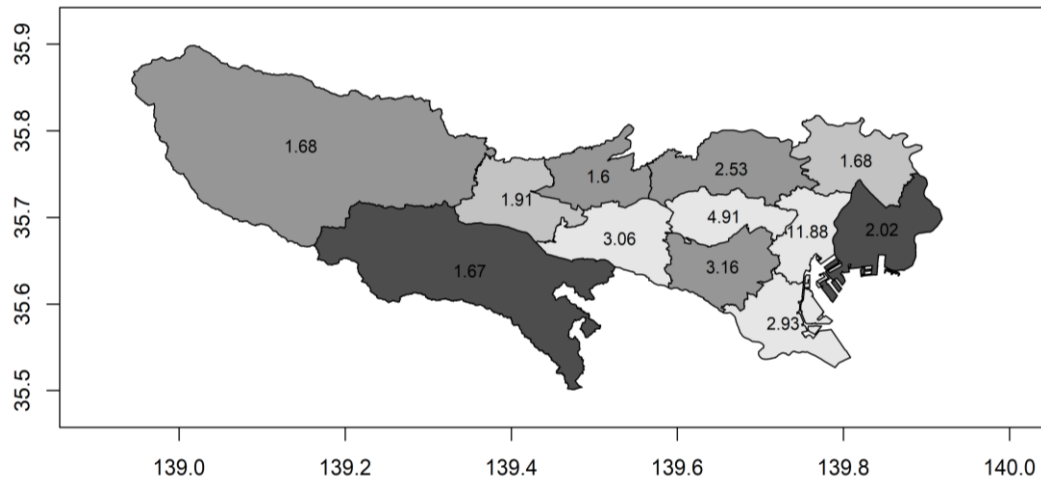


※**黒色が強いほど、医師増加優先順位が高い**。数字は各二次医療圏の人口1000人対医師数

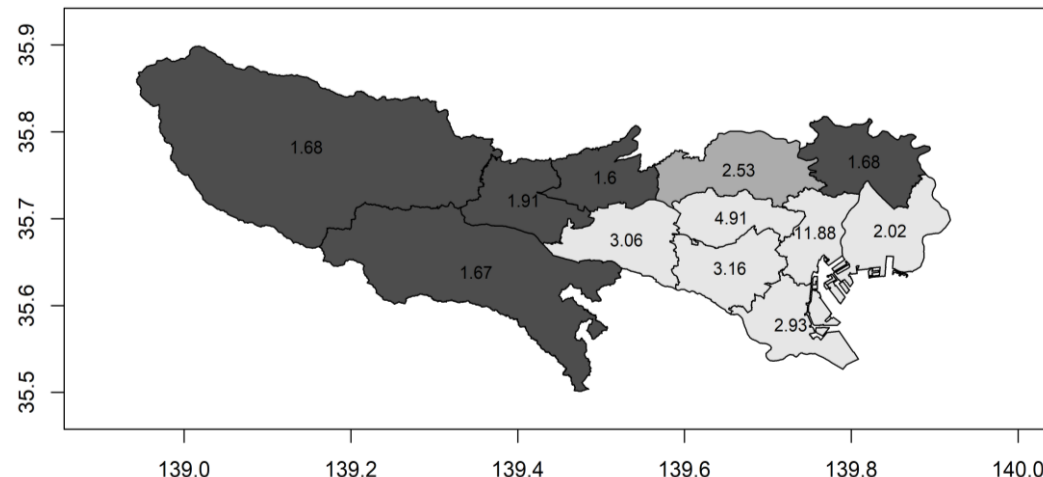
- (a)では、西東京エリアのような、人口1000人対医師数が低い地域に優先順位を高く割り当てている一方で、なるべく隣接する二次医療圏が同じ色にならないよう、ある程度の**ばらつきをもった塗分け図**になっている
- (b)では、東京の周辺部のエリアに優先順位を高く割り当てた地域が集積し、中央部では優先順位を低く割り当てた地域が集積するなど、**色の集積が認められる**

塗り分け図：量子アニーリング

(a) 第3項を含み隣接関係を考慮する場合



(b) 第3項を含まず隣接関係を考慮しない場合



※**黒色が強いほど、医師増加優先順位が高い**。数字は各二次医療圏の人口1000人対医師数

- (a)では、シミュレーテッドアニーリングの結果同様、人口1000人対医師数が低い地域に優先順位を高く割り当てた一方、**ある程度ばらつきをもった塗り分け図**となった
- (b) 優先順位を高く割り当てた地域と、優先順位を低く割り当てた地域がそれぞれ集積しており、隣接関係を考慮した場合に比べ、**色のばらつきは認められなかった**

モラン統計量の比較

表 塗り分け図のモラン統計量

	シミュレーテッドアニーリング	量子アニーリング
(a) 隣接の考慮あり	-0.295 (p=0.17)	-0.38 (p=0.08)
(b) 隣接の考慮なし	0.322 (p=0.03)*	0.288 (p=0.04)*

■ シミュレーテッドアニーリングも量子アニーリングも下記の所見が得られた

(a)第3項を含む**隣接関係を考慮する場合**は、統計学的有意ではないものの、**負の空間的自己相関**が認められ、隣接関係を制約条件にしたことによって、塗り分けにばらつきが生じている

(b)第3項を含まない**隣接関係を考慮しない場合**は、統計学的有意に**正の空間的自己相関**が認められ、同色の集積性が認められた

Join Count統計量：シミュレーテッドアニーリング

(a)第3項を含み隣接関係を考慮する場合

色の組合せ	Join count	期待値	z-value
1:1	0.05	0.55	-1.30
2:2	0.00	0.09	-0.57
3:3	0.00	0.09	-0.57
4:4	0.72	0.55	0.46
2:1	0.13	0.73	-1.37
3:1	0.95	0.73	0.52
3:2	0.15	0.36	-0.67
4:1	1.04	1.45	-0.73
4:2	2.51	0.73	4.11
4:3	0.44	0.73	-0.65
Jtot	5.23	4.73	0.94

(b)第3項を含まず隣接関係を考慮しない場合

色の組合せ	Join count	期待値	z-value
1:1	0.05	0.55	-1.30
2:2	0.00	0.00	NA
3:3	0.00	0.00	NA
4:4	3.23	1.36	3.29
2:1	0.62	0.36	0.82
3:1	0.33	0.36	-0.11
3:2	0.00	0.09	-0.57
4:1	1.05	2.18	-1.78
4:2	0.19	0.55	-0.92
4:3	0.53	0.55	-0.03
Jtot	2.72	4.09	-2.23

※最も医師増加優先順位が高い色が1であり、優先順位が低くなるにつれ2,3,4と数字が大きくなる

(a)1:1や2:2などの同色の組合せのJoin count値は低く、同色の隣接を避けるように色が割り当てられている。一方で、優先順位が最も低い色と優先順位が2番目に高い色の組合せが統計学的有意に高くなっており、ばらつきをもって塗り分けがされている

(b)4:4という、優先順位が最も低い色の集積が統計学的有意に認められた。また、Jtotが統計学的有意に期待値を下回っており、同色の集積が認められる

Join Count統計量：量子アニーリング

(a)第3項を含み**隣接関係を考慮する**場合

色の組合せ	Join count	期待値	z-value
1:1	0.00	0.09	-0.57
2:2	0.13	0.55	-1.07
3:3	0.00	0.09	-0.57
4:4	0.72	0.55	0.46
2:1	0.05	0.73	-1.57
3:1	0.58	0.36	0.69
3:2	0.52	0.73	-0.47
4:1	0.63	0.73	-0.22
4:2	2.92	1.45	2.57
4:3	0.44	0.73	-0.65
Jtot	5.14	4.73	0.78

(b)第3項を含まず**隣接関係を考慮しない**場合

色の組合せ	Join count	期待値	z-value
1:1	0.67	0.91	-0.49
2:2	0.00	0.00	NA
4:4	2.69	1.36	2.33
2:1	0.29	0.45	-0.48
4:1	1.28	2.73	-2.22
4:2	1.08	0.55	1.38
Jtot	2.64	3.73	-1.71

※最も医師増加優先順位が高い色が1であり、優先順位が低くなるにつれ2,3,4と数字が大きくなる

(a)シミュレーテッドアニーリングの結果と同様、**同色の隣接をできるだけ避けるように**、また、一方で**ばらつきをもって塗分け**がされている。優先順位が最も低い色と優先順位が2番目に高い色の組合せのJoin count値が、統計学的有意に高くなっている

(b) シミュレーテッドアニーリング同様、4:4という、優先順位が最も低い**色の集積が認められる**

結果と考察 まとめ

- シミュレーションの結果、シミュレーテッドアニーリングでも、量子アニーリングでも、人口1000人対医師数が少ない地域に医師を優先して増加するような割り当てが行われていた
- 隣接関係を考慮したハミルトニアンを導入した場合は、しない場合に比べ、塗分けにばらつきが生じており、**医師数なるべく均等にしつつ、医師数を増やす地域が集中し過ぎないような最適化**が実行されていた
- 実データと地理空間情報を用いてハミルトニアンを設定することによって、**実状況に沿った最適化を実装**することができた

限界と今後の課題

- ハミルトニアン設計について、4色に割り振ったペナルティの設定や、隣接条件の重みの設定など、改良の余地
→条件を変えた上で感度分析を行い、実用に適したハミルトニアン設定を目指す
- 本研究では横断的なデータのみを用いている
→縦断的時系列データを用い、医師数変化量も踏まえたハミルトニアン設計が必要
- 得られた塗分け図の通りに医師を増加させれば、各地域の健康状況が改善するかどうかは定かではなく、塗分け図を社会医学的に評価する必要性
→今後はより社会医学的に重要なアウトカムと紐づけて議論する必要

結論

- 医師配置最適化問題を制約条件付き組合せ最適化問題と捉え、量子アニーリングを用いた最適化シミュレーションを行った
- 実データと地理空間情報を用いて制約条件とハミルトニアンを設計することで、実状況に沿った最適化を実装することができた
- 今後は、さらなるハミルトニアンの改良と、得られた塗分け図が社会医学的に妥当であるのか評価する必要がある