

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14979

研究課題名（和文）量子アニーリングを用いた医療資源配置最適化シミュレーション

研究課題名（英文）Allocation optimization of medical resources using quantum annealing

研究代表者

川口 英明（Kawaguchi, Hideaki）

慶應義塾大学・理工学研究科（矢上）・特任講師

研究者番号：30813969

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：医療資源データを用い設計したハミルトニアンに対し量子アニーリングを実行し、医療資源の最適配置を示す色塗り分け地図を作成した。また、得られた色塗り分け地図の通りに医療資源を変化させると、各地域の健康状況にどのように影響するのかを検証した。隣接条件を設定した上で量子アニーリングを実行することで、医療資源が少ない地域に優先順位が高い色を割り当てつつ、同じ色になるべく隣り合わないよう分散した塗り分け図を得ることができた。さらに、量子アニーリングの結果得られた塗り分け図に従って、精神科医・心療内科医数を増減させることで、自殺死亡率の地域差を減少させ、かつ全体の平均値を低下させることができると確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、医療政策のシミュレーション研究における量子アニーリングの応用事例として、国内外で先進的な知見をもたらす成果である。本研究結果から、量子アニーリングの結果得られた塗り分け図に従って、医療資源を増減させることで、各疾患の健康状況の地域差を減少させる可能性が得られた一方、十分に地域差を解消するためには、相当数の医療資源数の増減が必要であることも確認された。医療資源数の増減のみでは十分な健康格差の解消につながらない可能性が想定されたため、各地域の特性に合わせた運用も同時に重要である可能性が考えられた。

研究成果の概要（英文）：Quantum annealing was performed using a Hamiltonian designed with medical resource data to create a color-coded map showing the optimal allocation of medical resources. We also verified the extent to which changing the medical resources according to the obtained map would affect the health status of each region. By performing quantum annealing with adjacency conditions, we were able to obtain a map in which different colors were assigned to neighboring areas while assigning a color with higher priority to areas with fewer medical resources. Furthermore, by increasing or decreasing the number of psychiatrists and psychosomatic physicians according to the map obtained by quantum annealing, it was confirmed that regional differences in suicide mortality rates could be reduced, and the overall average suicide mortality rate could be lowered.

研究分野：医療情報学

キーワード：量子アニーリング ヘルスサービスリサーチ 空間統計学

1. 研究開始当初の背景

(1)医療資源の配置問題について

昨今、COVID-19 などの新興感染症に対する適切な医療提供体制を中心に、医療資源配置の重要性が改めて社会的に認知されてきている。医師及び診断や治療に用いる医療機器といった医療資源の配置が適切でない場合、各地域で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、その適正配置は喫緊の課題である。

例えば、医師配置問題は、医療資源配置の中でも重要性の高い課題の一つとして扱われてきた。医師数の全体像に関し、診療科に着目した医師のキャリアパスと将来推計に関する研究が行われてきたが、医師・歯科医師・薬剤師調査のデータをもとに、診療科別医師数の将来推計が行われた結果、今後、総医師数は増え続けると予測されている。また、政策的な方向性も鑑みると、今後の総医師数は増加傾向にあると考えられる。しかし、医師数問題で喫緊の課題となっているのは、医師の地理的偏在である。総数や診療科別の医師数は増加傾向ではあるものの、医師数を増やしても医師の地理的偏在は改善されないという報告があり、今後もこの傾向は続いていくことが予測されるため、どのように医師配置を適正化するかは重要な課題である。

この問題に対し、地理情報システムと既存の公的統計に空間統計学的手法を適用し、医療資源の分布と各地域の健康状況の関連性を精緻に分析してきたが、これまでの研究は、医療資源配置問題が与える影響に関する現状分析に留まっていた。一方で、医療資源の最適配置を直接的に算出する試みに取り組んだ研究報告は少ない。今後、実データに則した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される。

(2)量子アニーリングについて

昨今、最適化シミュレーションの手法として、量子アニーリングが注目を集めている。量子アニーリングは、量子揺らぎを利用し、ハミルトニアンと呼ばれるコストを表す関数が最低となる状態を探索することで、組合せ最適化問題を高速に解く技術である。医療資源配置に関しても、組合せ最適化問題の枠組みで捉えなおすことで量子アニーリングを適用することが可能であり、今後ますます使用できるデータ量が増大することを鑑みると、高速に解くことのできる量子アニーリングの活用は検討に値する。しかしながら、現状で量子アニーリングの医療政策への応用はほとんど存在しない。

(3)医療資源配置最適化問題と量子アニーリング

医療資源配置の最適化のためには、各地域の医療資源がなるべく均等になるように増やすべき地域を割り当てつつ、公平性の観点から医療資源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がある。つまり、医療資源配置最適化問題は、制約条件付き組合せ最適化問題と捉えられる。そのため、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療資源配置最適化シミュレーションを行えるのではないかと考えられる。

2. 研究の目的

実データを用い設計したハミルトニアンに対し量子アニーリングを実行し、医療資源の最適配置を示す色塗り分け地図を作成する。また、得られた色塗り分け地図の通りに医療資源を変化させると、各地域の健康状況にどのように影響するのかを検証する。

3. 研究の方法

(1)研究デザイン

本研究は、公的な二次データを用いた研究であり、地域レベルでの医師数データや、人口データなどの社会経済的データの集計値(マクロデータ)を利用した研究である。本研究では、日本のすべての二次医療圏を対象としたが、日本全土を対象とする前に予備的実験として東京都を対象とした実験を行った。

本研究では、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、医療資源を増やす優先順位を表す4色を地図に塗り分けた。順番に、優先順位が高い、優先順位が比較的高い、優先順位が比較的低い、優先順位が低い、を表す4色である。

(2)データの獲得・生成

統計法第33条に則った申請により、2017年度の医療施設静態調査のデータを獲得し、二次医療圏単位の集計データに変換した。また、政府統計の総合窓口(e-Stat)から、2018、2020年度の医師・歯科医師・薬剤師調査のデータを取得し、地理情報と共に集計した二次医療圏データに突合せた。それぞれの医療資源データは、各二次医療圏の人口10万人当たりのデータとして使用した。人口データなどの社会経済的データについては、2020年度に実施された国勢調査のデータを用いた。

(3)空間重み行列の設定

空間統計学的手法のうち、隣接関係を定義する空間重み行列を設定した。本研究では、各二次医療圏の地域ポリゴンの幾何学的重心(セントロイド)を、各二次医療圏の代表点とした。代表点の隣接関係としては、ある二つの地域ポリゴンの区境界が隣接しているかどうかで隣接関係を定義した。次に、定義した隣接関係に重みを定義し、空間重み行列を設定し、地点間の近接性を表現した。本研究では、空間重み行列の作成のため、緯度・経度を用いて、各地域ポリゴンの代表点間の大円距離を算出し、その逆数の二乗を重みとして用いた。これは、距離が遠いとその分重みが小さくなることを意味する。

(4)空間統計を用いたハミルトニアン設計

実データに空間統計を適用し、ハミルトニアンを設計した。本研究では、組合せ最適化問題のうち地図の塗り分け問題に着目し、医療資源を増やす優先順位を表す色を地図に塗り分けた。医療資源配置最適化のためには、医療資源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、各地域の医療資源数が均等になるよう、各二次医療圏に色を割り当てる必要がある。これらの制約条件を踏まえ、本研究では、各二次医療圏に確実に1色を割り当てる制約項、医療資源数データを用い各二次医療圏の医療資源数を均等にするためのコスト項、空間重み付行列を用い、隣接する二次医療圏間なるべく違う色にするためのコスト項、の合計3項から成るハミルトニアンを設計した。なお、隣接条件に応じて重みを変えられるように、隣接条件ごとにハミルトニアンを分割して設計した。

目的関数の設定について、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ることとした。すなわち、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、 $\sum_{i,j} w_{ij} (x_i - x_j)^2$ のすべての和とし、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、 $\sum_i c_i x_i$ の和として設定した。

(5)量子アニーリングの実行

D-Wave マシンを用いた量子アニーリングと従来コンピュータによるシミュレーテッドアニーリングを、隣接関係を考慮する場合と、隣接関係を考慮しない場合に分けて実行した。量子アニーリング、シミュレーテッドアニーリングは、共にそれぞれ1000回サンプリングし、最もハミルトニアンが低い値の時の解を、組合せ最適解とした。

(6)空間統計モデルの構築

得られた塗り分け図を評価するために、塗り分け図通りに医療資源数を変化させた場合にどの程度各地域の健康状況に変化が生じるのかを検証する必要がある。本研究では、空間統計モデルの代表的な回帰分析モデルであるCARモデルを用いて検証した。より具体的には、各地域の疾患死亡数を目的変数としたCARモデルを設計し、説明変数として設定した医療資源数を塗り分け図通りに変化させると、どの程度その疾患死亡数が変化するかを調べた。

4. 研究成果

(1)東京都を対象とした予備的実験

東京都の二次医療圏(島しょ除く)を対象に、予備的実験として、意図したとおりの地図の塗り分けができていたのかを検証した。東京都の二次医療圏ごとの総医師数のデータを用い、隣接条件を考慮した場合と考慮しない場合で、量子アニーリングを実行した。シミュレーションを行った結果、隣接条件を考慮した場合には、医師が少ない地域に優先順位が高い色(黒色が強いほど、医師増加優先順位が高い)を割り当てつつ、同じ色になるべく隣り合わないよう分散した塗り分け図を得ることができた(図1)。一方で、隣接条件を考慮しない場合には、単に医師数が少ないところに優先順位が高い色を割り当てるに過ぎず、色の集積が認められた(図2)。

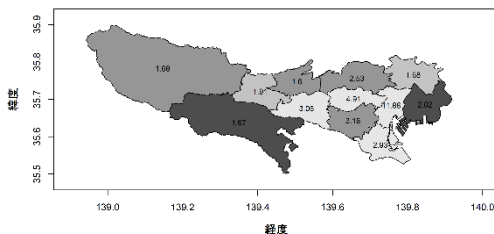


図1 隣接を考慮した塗り分け図(東京都)

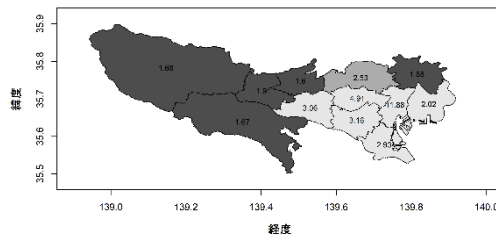


図2 隣接を考慮しない塗り分け図(東京都)

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1000回サンプリングし、得られたハミルトニアンの中で最も低い値をまとめたところ、隣接関係を考慮する場合も、隣接関係を考慮しない場合のどちらの場合でも、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を提示したが、近い値を提示したため、得られた塗り分け図としては近いものが得られた。

(2)日本全土を対象とした実験

続いて、日本全土を対象とした実験を行った。使用した医療資源データは、精神科医数、心療内科医数、冠動脈 CT を有する施設数であり、それぞれ二次医療圏単位の集計データにし、地理情報と突合させて空間統計用のデータを作成した。その後、そのデータをもとにハミルトニアンを設計し、量子アニーリングを実行して組合せ最適化を行い、各医療資源を増やす優先順位を表す色を地図に塗り分けた。なお、ハミルトニアン設計については、隣接条件に応じて重みを変えられるように、隣接条件ごとにハミルトニアンを分割して設計し、重みの値を変えて量子アニーリングを実行することで、複数パターンの塗り分け図を作成した。

量子アニーリングの実行にあたり、予備実験と異なる点として、日本全土の二次医療圏(335 地点)を扱うため、4 色の塗り分け問題を扱う場合は 1340 ノードの量子ビットが必要となり、現在の D-Wave マシンではそのままの状態では実装することはできないという課題が生じた。これに対して、以下の 2 つのアプローチで、実装を試みた。

qbsolv という、一度問題を分割しタブサーチを用いて最後に結果を統合する手法で実装する D-Wave が提供しているハイブリッド・ソルバーサービス (HSS) を活用する

本研究では、シミュレーテッドアニーリングと、qbsolv を用いた量子アニーリングをそれぞれ 1000 回サンプリングし、HSS を活用した場合は実装の都合上、100 回サンプリングし、それぞれ得られたハミルトニアンの中で最も低い値の時の解を組み合わせ最適解とした。

実験の結果、隣接条件の重みを変えた場合、シミュレーテッドアニーリング、qbsolv、HSS のうちどれが最も低いハミルトニアンを提示するかは重みに依存して異なったが、隣り合う二次医療圏で同色にする隣接条件に強めのペナルティを設定すると qbsolv が、弱めのペナルティを設定すると HSS が低いハミルトニアンを提示する傾向であった。また、隣接条件を考慮しない場合、qbsolv が最も低い値を算出していた。

以下に、作成した医療資源最適配置塗り分け図の中でも、精神科医師数と心療内科医数の合計値に対して作成した塗り分け図を提示する。qbsolv で得られた塗り分け図を見てみると、予備実験同様、隣接条件を考慮した場合は、精神科医師・心療内科医が少ない地域に優先順位が高い色(橙色が強いほど、医師増加優先順位が高い)を割り当てつつ、同じ色になるべく隣り合わないよう分散した塗り分け図を得ることができた(図 3)。一方で、隣接条件を考慮しない場合は、単に精神科医師・心療内科医が少ないところに優先順位が高い色を割り当てるに過ぎず、色の集積が認められた(図 4)。

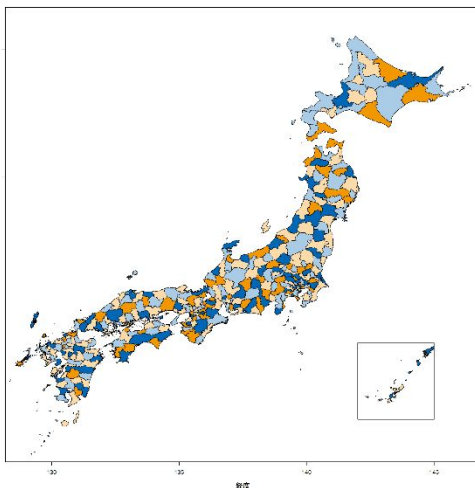


図 3 隣接を考慮した塗り分け図(日本)

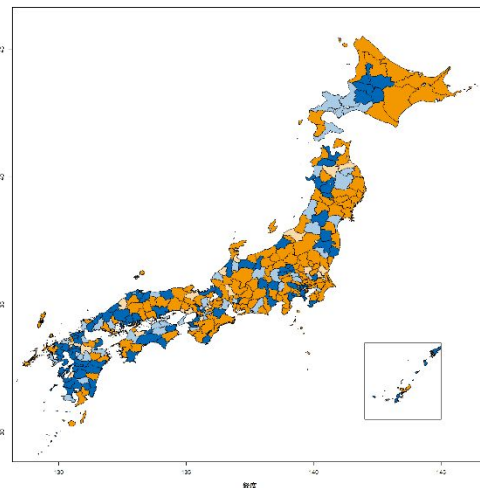


図 4 隣接を考慮しない塗り分け図(日本)

続いて、塗り分け図の中で示された優先順位に基づいた精神科医・心療内科医数の変化量と、CAR モデルで算出された回帰係数とを掛け合わせることで、自殺死亡率の地域差への影響をシミュレーションした。まず、2018 年から 2020 年における精神科・心療内科医数の二次医療圏ごとの変化率の 第 1 四分位点+1.5×IQR (box plot の上限値)、第 1 四分位点、第 3 四分位点、

第 3 四分位点-1.5×IQR (box plot の下限値) を算出し、隣接条件を考慮した場合と考慮していない場合の塗り分け図の色に合わせて各二次医療圏に - の数字を割り当てた。次に、あらかじめ作成していた自殺死亡率 (SMR) を目的変数とする CAR モデルにおける精神科医・心療内科医数の回帰係数に、各二次医療圏に割り当てられた数字を掛け合わせ、各二次医療圏の SMR の予測値を変化させた。なお、どのくらいの変化が SMR に影響するのかを詳細に調べるため、変化率に乗数を設けて、1 乗から 5 乗まで 0.5 刻みで変化率を動かす、感度分析のようにシミュレーションを行った。

塗分け図の優先順位に従い精神科医・心療内科医数を変化させ、シミュレーションの結果得られた SMR の Moran 統計量の変化を表したのが図 5 である。横軸が変化率に設けられた乗数の大きさ、縦軸が Moran 統計量の大きさを表す。点線は、精神科医・心療内科医数を変化させていない時のベースラインの SMR の Moran 統計量を表す。隣接条件を考慮した場合の結果が赤 (qbsolv)、橙 (HHS) の線で表されているが、変化率に設けられた乗数を大きくしていくにつれ、Moran 統計量は低下していき、二次医療圏単位の SMR の偏在は解消されていくことがわかる。一方で、隣接条件を考慮した場合の結果が、青 (qbsolv)、緑 (HHS) で表されているが、変化率に設けられた乗数を大きくしていても、中々 SMR の Moran 統計量はベースラインから大きくは低下しなかった。

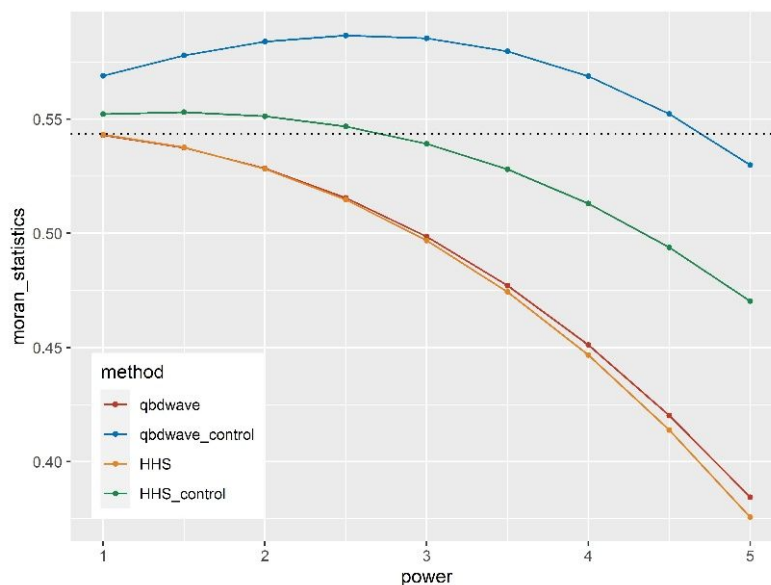


図 5 SMR の Moran 統計量の変化

最後に、乗数が 5 の場合に、SMR が全体として低下しているか、平均値の差の検定をおこなったところ、隣接条件を考慮した場合、qbsolv でも HSS でもベースラインに比べて統計学的有意に SMR が低下していることが確認された。

このように、qbsolv や HSS といった量子アニーリングを実行した結果得られた地図の塗分け図に従って、精神科医・心療内科医数を増減させることで、自殺死亡率の地域差を減少させ、かつ全体の平均値を低下させることができると確認された。一方で、十分に自殺死亡率の地域差を解消するためには、相当数の医師数の増減が必要であることが確認された。例えば、乗数が 5 の場合、に該当する医師の変化率は 3.54 であった。これはその二次医療圏の精神科医数・心療内科医数を 3.54 倍にする必要があることを意味し、現実的な運用では難しいケースであることがわかる。したがって、現実的に自殺死亡率の地域差を解消するためには、精神科医・心療内科医数の増減のみでは不十分であり、各地域の特性に合わせた運用も同時に重要である可能性が考えられた。

本研究の成果は、医療政策のシミュレーション研究における量子アニーリングの応用事例として、国内外で先進的な知見をもたらす成果である。本研究成果から、医療資源数の増減のみでは十分な健康格差の解消につながらない可能性が想定されたため、今後は、各地域の特性を取り入れたシミュレーションと併せて実験計画を立てることで、より精緻なシミュレーションにつながるのではないかと考えられる。さらに、より幅広い医療資源と疾患死亡率との関係性についても、同様のシミュレーションを行う必要があると考えられる。

本研究では、量子アニーリングに実問題を実装するところで、当初は予期していなかった qbsolv や HSS などを用いた工夫が必要となった。これにより、qbsolv や HSS のシミュレータとしての性質を併せて調べることができ、新たな知見を得ることができた。特に、HSS は内部の挙動が明らかにならなかつ、実際に使用してみないと分からないことが多いが、得られた結果を見る限り、シミュレーテッドアニーリングに近い結果を算出する傾向がうかがえた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 川口英明	4. 巻 2020-QS-1(23)
2. 論文標題 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	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会 研究報告（第1回量子ソフトウェア研究発表会）	6. 最初と最後の頁 1,7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 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
2. 発表標題 川口 英明
3. 学会等名 第1回量子ソフトウェア研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 川口英明（他合計60名、技術情報協会）	4. 発行年 2023年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 484
3. 書名 量子技術の実用化と研究開発業務への導入方法	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------