

いかなる場所に人々は集まり住むのか？

—街と道の千年紀シミュレーション

青木高明

あおき たかあき
香川大学教育学部 takaaki.aoki.work@gmail.com <https://www.ed.kagawa-u.ac.jp/~aoki/>

古来、人々は都市を建設し、それらを繋ぐように道を開いてきました。現代社会においても、都市と道路の立地は、人々の活動と流れを決定しています。そのため「いかなる場所に人々は集まり住むのか？」というテーマは、多くの研究者が関心を寄せ、長年議論されてきました。我々の研究グループでも、数理科学的手法を用いた研究論文を発表しています^{*1}。この研究を紹介するとともに、「文理融合型研究において、数理モデルやシミュレーションはどんな役割を果たせるのか」について考えてみます。

山や河川・海岸線などの地形は、都市や道路の立地にどれだけ影響しているのか？

山や河川・海岸線などの地形が、都市の立地や規模において重要であることは、自明に思われます。事実、近代地理学の始めから、地形は当然のように重要な因子として議論され、むしろ歴史・文化・社会といった、地形を超えた諸要因へ焦点が当てられてきた面もあります。

しかし、もう少し踏み込んで考えると難しい。影響するか否かという二択問題ならまだしも、「どの程度影響するか？」「どのように影響するか？」といった問い合わせるには簡単ではありません。例えばローマを題材に考えてみます。もしもローマの丘陵地が実際よりさらに陥しかったら、あるいはローマ近隣にもっと生存しやすい土地があったなら、古代ローマはあそこまで発展できたのか？開拓や土木工事で土地の拡張や平坦化が

可能であることを考えると、あながち荒唐無稽な仮定でもありません。言い換えると、ある都市の発展に土地の地形的特質が重要であったとき、地形的特質が多少なりとも損なわれたなら、その都市はどうなっていたのか？逆に、人為的に工事などで増強したら、どれだけプラスになりうるのか？このような問い合わせは、国土計画を考える上でも有益な疑問です。

では、その疑問に対してどうやってアプローチするか。現実の地形は容易に変更できませんし、古代ローマに戻ることもできません。代わりに、仮想的な実験環境——数理モデル——の出番となります。

「パターン形成」として都市立地を理解する

都市の立地や規模に対する数理モデルの研究は、1930年代から行われてきました。なかでも先駆的研究として、クリスタラーとレッシュによる「中心地理理論」^{2,3}があり、その後の研究発展に大きな影響を残しました。

中心地理理論は単一都市の立地に関する議論ではなく、都市群の空間的パターンに関する議論です。都市機能が提供する財やサービスを国土全体にまんべんなく届けたい。しかし一方で、移動・輸送にはコストがかかる。この理論では、両者のバランスを取るために、どんな都市の配置が効率的かという問題設定を導入しました。そして、均一平面の土地において、格子状の規則的な配置パターンが最適であるとの議論を展開しています^{*2}。

*1—この論文は、2022年にScientific Report誌に掲載された論文¹の解説記事です。図6を除き、一部改変して再掲しています。

*2—財の種類にもとづく階層性などの議論もありますが、今

この議論の重要な点を確認します。一つは、合理的なメカニズムによって、規則的な都市パターン構造が自然発生的に生まれうるという視点です。特にレッシュ以降の議論に従うと、中央集権的にすべてを制御することなしに、人々の合理的判断と相互関係の結果として、自己組織的に秩序だった配置が発生するということを示しています。

広く学問分野を眺めると、1952年のアラン・チューリングの論文⁴やバロウソフ-ジャボチンスキ反応の発見を嚆矢として、「パターン形成」の科学が生まれています。パターン形成の科学は、個体発生(初期胚から秩序だった組織や器官が作られる過程)、熱帯魚やシマウマなどの体表模様、タイガーブッシュのような植生パターン、うろこ雲や筋状雲のように自然界に見られる規則的なパターンに注目し、単純なルールの結果として、自然発生的に秩序構造が形成されることを示してきました。一見すると、細胞・森林・気象は大きさも対象も支配法則も異なりますが、パターン形成の原理を抽出すると、共通性があることが知られています。都市立地も同様に、パターン形成の一例として位置づけることができます。

議論の重要な点の二点目は、中心地理論が等方的かつ均一な平面を想定している点です。この非現実的ともいえる仮定は、パターン形成モデル全般に散見され、相応の意図があります。すなわち、仮に土地に全くの差異がなかったとしても、ある場所は都市となり、別の場所は都市にならないという「差異」が生まれることを、この一様平面という仮定は明確化しているわけです。

地形条件の定量的評価

しかし一方で、一様平面仮定が現実味を失わせていることも事実でしょう。そこで我々は、数理モデルに現実の地形データを組み込むことを考えました(図1)。地形によって、格子状の規則的な配置パターンはどのように変化するのか？ その



図1—90 m の高精度地形データ上における、街と道の共発展シミュレーションモデルの概念図

流入>流出なら都市は発展し、その逆では衰退する。また大都市への経路は発展し、小規模村落への経路は衰退する。

変化から、地形条件の効果を定量的に分析することが、我々の着眼点です。

図2では、イタリア半島を事例に、90 m 精度の地形データを組み込んだシミュレーション結果を示しています。従来の中心地理論と同様の一様平面に対して、海岸線、標高、河川・湖・海洋のデータを段階的に組み込んでいます。一様平面の場合は、都市(人口集積地)がおおよそ等間隔に分散しており、十分に時間経過すると最終的には格子状の規則的な配置パターンに落ち着きます。ここに海岸線の情報を入れることで、境界が決まります。さらに、標高データを入れることで、急傾斜は移動しにくいといった土地勾配に応じた移動コストを加味します^{*3}。また、河川・湖・海洋といった水体は、移動を妨げる壁にもなれば、海上交通の道にもなります。さきほど海岸線を組み込んだ段階では、移動を妨げる壁でしたが、最終的に水体データを組み込む段階では、然るべき移動コストのもと、海上交通の経路として扱っています。これらの地形データの組み込みによって、規則的な配置パターンが変化し、特定の場所に都市が発生する結果となりました。平野部に大都市が散見されますが、平野部のどこでも発生するわけではなく、特定の場所に局在します。

地形データを組み込むことで、どの程度、実際の人口分布に近づいたのでしょうか。図3に、2011年のイタリア州別人口との比較を示しています。数値モデル出力は、河川・湖・海洋のデータ

回は割愛しています。またこの議論はアイザードの地域科学や新経済地理学(NEG)の発展へと繋がっていきます。

*3—GIS(地理情報システム)における Least-cost distance(最小コスト距離)を計算しています。

地形条件の段階的付与

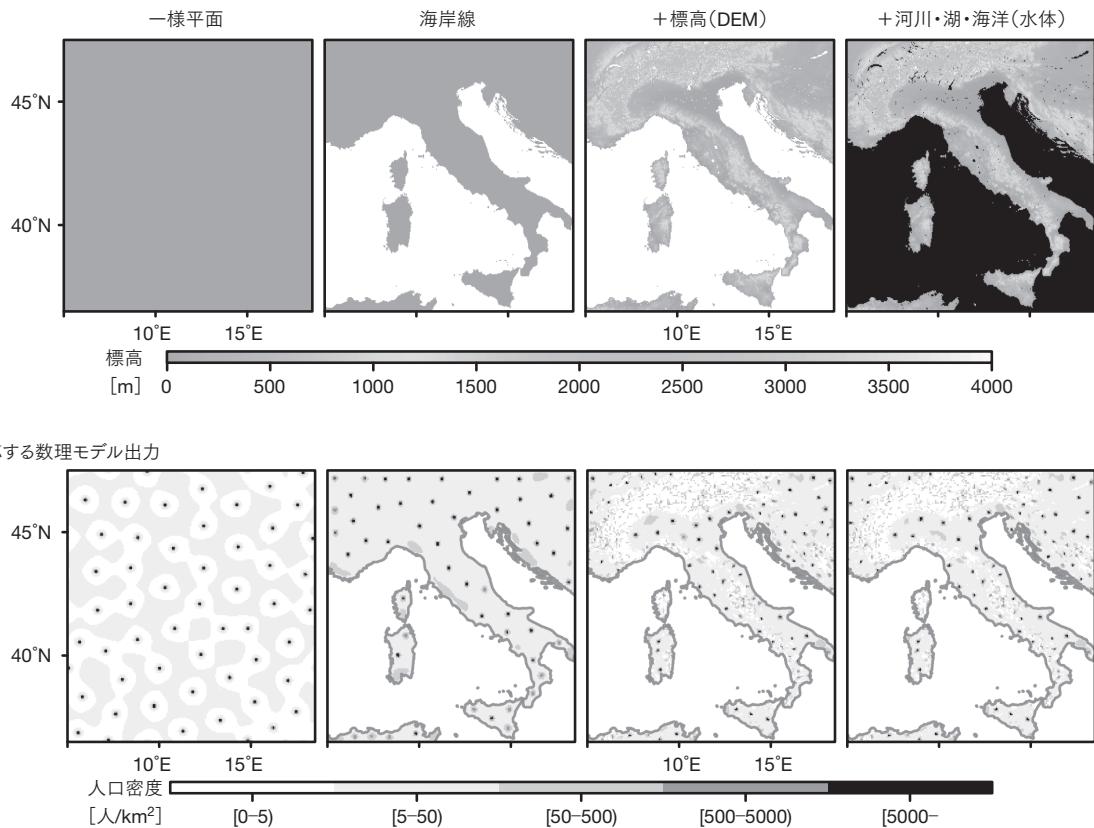


図2—地形データを組み込んだシミュレーション結果

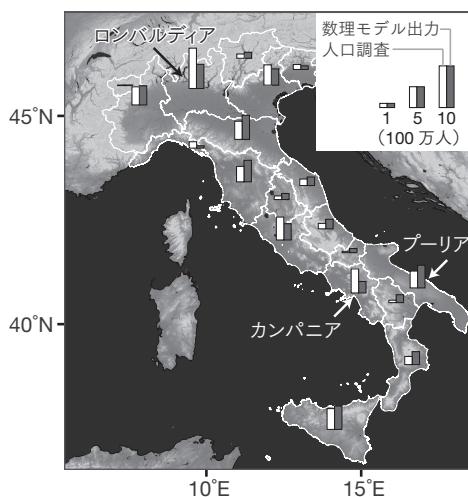


図3—イタリア州別人口と、河川・湖・海洋のデータまで組み込んだ数値モデル出力との比較

タまで組み込んだ結果です。人口の少ない地域に對して数値モデル出力も同様に少なく、人口の多い地域に對しては人口が集積しており、おおよその傾向は捉えているようです。しかし、ズレが目立つところもあります。ロンバルディア州・カンパニア州は過小に見積もられて、プーリア州は過大評価されています。

もっと細かく、県単位で見ていきます(図4)。エラーバーはシミュレーションの出発時点の人口分布にランダムなゆらぎを加えた際の、出力結果のばらつき(標準偏差)を表現しています。標高データを組み込むことで、出力結果のばらつきが軽減することが見て取れます。2011年の人口調査と比較すると、特にトリノやミラノはよく一致しています。ミラノについては興味深く、河川・湖・海洋のデータを加えることで、初めて一致してきます。

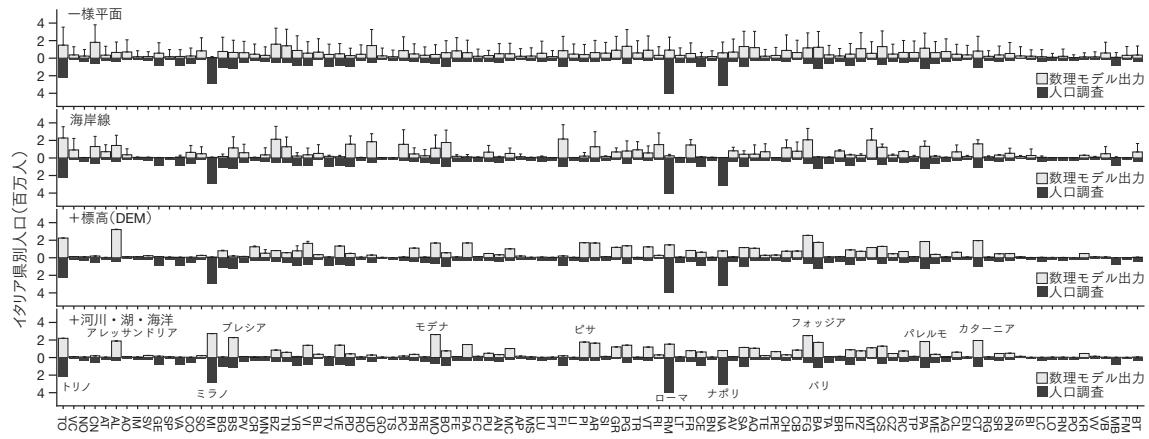


図4—イタリア県別人口と数値モデル出力との比較

これはミラノの発展における河川の重要性を示しています。一方で、ズレが多い地点もあります。特にローマやナポリについては、現実よりもだいぶ少ない人口を出力しています。

歴史要因の組み込み

次に、歴史要因の組み込みを紹介します。都市や道路は、過去の遺産や歴史の影響を受けながら段階的に発展してきたと想定されます。そのため、地形データだけでなく、歴史要因の一部についても数理モデルに「足し算」してみましょう。

数理モデルの視点からは、初期状態依存性が歴史要因と関連します。このモデルでは、初期状態として最初に都市配置パターンを与え、それをルールに従って逐次的に更新していくことで都市・道路が発展し定常状態(均衡状態)に至ります。モデルが示す定常状態は一つではありません。初期の都市配置パターン次第で、最終的な都市配置パターンが異なることがあります。すなわち過去の状態が影響して、将来が変化するわけです。

もし古代ローマの都市配置パターンから出発したらどうなるでしょうか。先に示した結果は、ほぼ均一な状態を初期状態としていました。あえて差異を排除した状態から、次第に都市が形成されるプロセスを見たわけです。この均一状態から出発したケースと比較することで、古代ローマの都市配置が現代に残す影響を調べることができます。

また地形データは変化せずとも、土地勾配による移動コストは徒歩や牛車で移動していた時代では現代と実効的な距離コストが変化しています。歴史GISの知見を踏まえたコスト関数を導入することで、交通手段の変化を組み込んでいます。

図5では、164年における都市分布からスタートして、1300年から1911年に至るまでの途中経過を示したものです。モデルの出力と、中世ローマでの推定人口分布との比較を表示しています^{*4}。1400年時点では、モデル出力と人口分布に乖離がみられるものの^{*5}、それ以外では現実と比較可能なレベルの推定値が得られています。

この歴史要因の組み込みによって、2011時点の人口分布としては、現実とのズレが16%低減しました^{*6}。

人文科学における数理モデル： 予測ではなく、思考実験

この仮想実験の結果をどのように解釈したらよいでしょうか。数理モデルと現実との比較において、「当たれば良い、外れたら悪い」と判断するのが自然な感覚でしょう。例えば、天気予報とい

*4—1911年での県区分で集計しています。資料等の詳細は原論文を参照ください。

*5—黒死病の影響か、都市人口が激減しています。

*6—これは人口分布のズレをカルバッカ-ライブラー距離で定量化し、評価した結果です。詳細は原論文を参照ください。

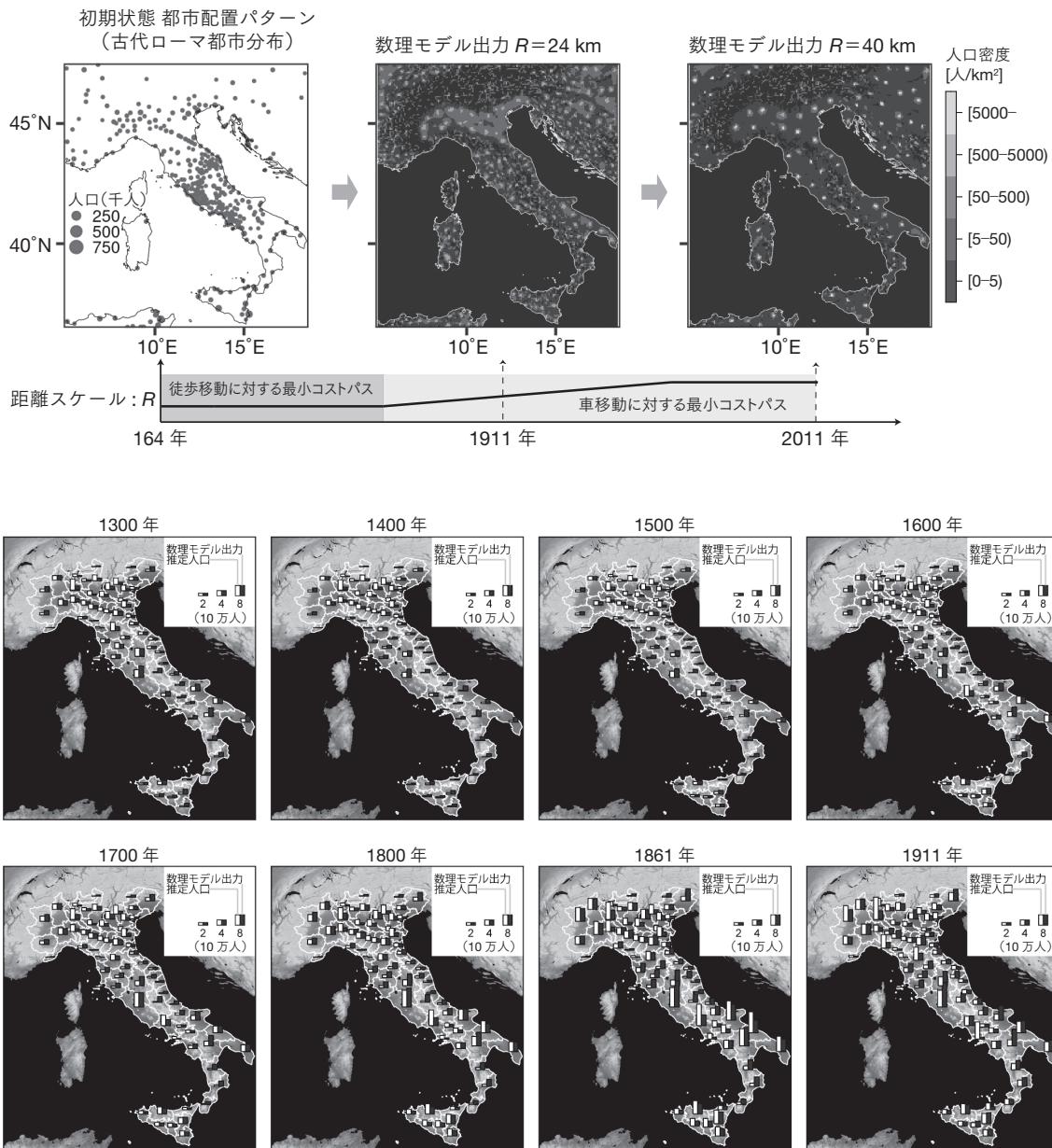


図5—歴史要因の組み込み

古代ローマの都市分布を出発点として、中世イタリアから現代までシミュレートした。

う身近な事例ですと、予測精度が重要です。しかし、「いかなる場所に人々は集まり住むのか」というテーマにとって、ズレも重要な意味をもっています。この点を明確化していくと、人文科学における数理モデルの役割も見えてきます。

そもそも、今回のテーマに即して、現実を完全に計算機上に再現することは不可能に思えます。例えば、どこに住むのかという問題について、

人々の考え方・志向・判断を100%再現することはできません。そのため数理モデル化に際して、あえて「人々は最適な行動を選択する」といった仮定をしたりします。もちろん現実は、人々が合理的な判断ばかりするわけではありません。しかし、あえて仮定する意図があります。それは、「もし人間が合理的な判断のみをした場合、何が導かれるのか考えてみたい」というものです。

このとき数理モデルが目指しているのは、歴史再現シミュレーターではなく、一種の思考実験です。その際、モデルの良し悪しを決めるのは、予測精度だけではなく、想定した仮想状況が研究テーマを理解する上で有益か否か、という視点です。

思考実験：もし地形条件だけ与えられていたら…

今回の思考実験を検討しましょう。「特定の土地に都市や交通網がどうして発展したのか」を理解したい。もし「地形データだけ」を所与の条件としたら、どこに都市と道が発展するのか。これが今回の思考実験です。

本来、都市・交通網の発展には多様な要因が関わっているはずです。自然環境要因としては、地形だけではなく、気候や水資源・植生・地質なども重要であるはずです。さらには、経済活動や政治、文化や言語、歴史などにも影響されているでしょう。現実世界の再現シミュレーターを目指すなら、これらを仮想空間に再現する必要があります。そういうアプローチは非専門家にもわかりやすいのですが、モデルが複雑化して扱いに困ります。

そのため数理モデルを考える上で、モデルの現実性と複雑さのトレードオフを意識する必要があります。図6に概念図を示しています。数理モデルの現実性を高めていくうとすると、可能な限り、思いつく全ての要素を数理モデルに組み込みたいという欲求に駆られるでしょう。概して、多くの要素やデータを組み込んでいくほど予測性能も上がりますので、一見問題がないように思います。しかし、自分たちでも理解できないほど数理モデルが複雑になって、ブラックボックス化します^{*7}。思考実験としては、想定する仮想状況はシ

*7—数理モデルには制御パラメータが存在し、パラメータ変化に伴うモデルの挙動を系統的に理解しておく必要があります。我々のモデルの場合だと、三つのパラメータがあります。しかし現実性を増すため、安易に多数の要因を組み込んでいくと、パラメータが数十から数百に増えています。仮に、それぞれのパラメータを10段階で変化させていくと、10個のパラメータだけでも 10^{10} の組み合わせになります。それらを網羅的に

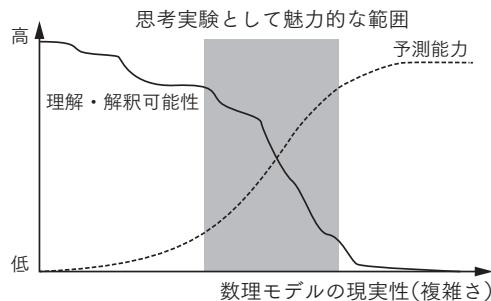


図6—数理モデルにおけるトレードオフ

モデルの現実性を高めていくため、多くの要素やデータを組み込んでいくと、概して予測性能は向上する一方、モデルの解釈・理解は困難になっていく。

ンプルなほど魅力的であり、「引き算」こそ大切です。相応の予測性能をもちながら、思考実験として魅力的な領域を探索し、研究者の価値判断のもと、適切なポイントを選択する必要があります。

我々も様々な価値判断のもと、要因を「引き算」していった結果、今回の思考実験に行き着きました。既存研究^{5~8}では、交通網・経済活動データ・人口統計・アメニティ指標など、多数のデータを所与の条件として与え、モデルの精緻化を目指す方向性があるのですが、その中で地形データが考慮されることは稀でした。そこで最小限の状況設定として、地形だけ残して、他の差異を無視した場合、どこまで現実の人口分布の差別化(都市と郊外)を説明できるか、と考えたわけです^{*8}。

比較の基準線としての役割

地形だけに注目し、他の要因を切り捨てたわけですから、どこかで現実と合わない部分が出るのは必然です。ポイントは、個別の土地ごとに現実とのズレが定量的に評価できることです。ズレを

シミュレーションするだけも困難ですし、まして人間側が系統的に理解するのは極めて困難です。

*8—この思考実験の実現にあたって、所与の条件とされていた交通網を、外部条件(外因性)ではなく、数理モデルで動かしていく変数(内因性)として組み込みました。交通網が社会の産物である以上、その背景にある人口・経済活動・地形などの諸要因が結果的に所与の条件に含まれてしまうことを避けるためです。モデル構築のアイディアについては紙面の都合で割愛します。

手ががりに、地形以外の要因をあぶり出し、次の思考実験へと進んでいくことができます。

さきほどの結果でも、トリノやミラノといった土地は一致度が高い一方で、ローマやナポリはおよそ1/3程度に見積もられていました。この過小評価は、地形以外の要因がローマやナポリの都市発展に重要であることを示唆しています。例えば、首都であること、港湾をもつこと、宗教的・歴史的な背景などが考えられます。

その意味で、今回の数理モデルの使い方は、比較のための基準線(ベースライン)を与えることです。統計学において、帰無仮説やヌルモデルといった概念がありますが、モデルの推定値からのズレに注目する点では、使い方として近いといえます。

地形以外の要因についても、段階的に「足し算」をしていくことで、基準線を洗練させていく。今回、歴史要因の一部をモデルに組み込みましたが、他にも水資源・気候条件・植生データなどを足し算していくことも可能でしょう。その結果、現実とのズレがゼロにならなくとも、その減少幅を分析していくことで、組み込んだ要因の効果を定量的に評価していく^{*9}。このような構築的アプローチを取ることで、本研究テーマ——いかなる場所に人々は集まり住むのか——という疑問に対して、数量的分析手法を導入することができます。

人文科学と数理科学の対話へ

異分野交流は容易ではありません。我々も2014年から「数理地理モデリング研究会」と題して、人文科学と数理科学との対話を目的とした集会を開催してきたのですが、数式一つで忌避されることもありますし、逆に多大な期待をもたれて困惑することもあります。

しかし、「魅力的な思考実験は何か?」「数理モデルの現実性と複雑性とのトレードオフの中で、何に焦点を当てるべきか?」といったテーマでの対話を深めることで、数理モデルの限界と価値に

向けて、有益な議論をしていくことができると思っています。

近年、シミュレーションや数理モデルといった用語は広く使用され、さらにはAI・機械学習やデータ分析などの広まりによって、これまで縁がなかった研究者も利用する機会が増えています。社会的にも新型コロナウィルス感染症対策に際して、シミュレーションや数理モデルが活用されています。しかし数理モデル・シミュレーションは、多義的な用語であり、その内実は様々です。研究者コミュニティと社会との接点のみならず、研究者間でも、誤解の原因となります。特に、予測や予報といった目的以外に数理モデルが使用される場合は、理解が難しい傾向があるようです。そのため、本記事では「思考実験」という切り口で、思考ツールとしての数理モデルの役割の一つを紹介してみました。数理モデルという用語の広がりを感じることで、今後の相互理解に役立つことができれば幸いです。

文献

- 1—T. Aoki et al.: *Sci. Rep.*, **12**, 10093(2022)
- 2—W. Christaller: *Central Places in Southern Germany*. Prentice-Hall(1966)
- 3—A. Lösch: *The Economics of Location*. Yale University Press (1954)
- 4—A. M. Turing: *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **237**(641), 37 (1952)
- 5—P. M. Allen: *Cities and Regions as Self-organizing Systems: Models of Complexity*. Gordon and Breach Science Publishers(1997)
- 6—T. Allen & C. Arkolakis: *Q. J. Econ.*, **129**(3), 1085(2014)
- 7—R. White et al.: *Modeling Cities and Regions as Complex Systems: From Theory to Planning Applications*. MIT Press (2015)
- 8—P. D. Fagelbaum & E. Schaal: *Econometrica*, **88**(4), 1411 (2020)

*9—今回はイタリア半島を題材にしましたが、今後は東アジアや中東など、個別地域に即した要因効果を議論することになります。