

気候変動と都市活動の相互影響 —分析の枠組みと展望—

紀伊 雅敦¹

¹正会員 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町221-20)

E-mail: kii@eng.kagawa-u.ac.jp

本稿では、全世界を対象とした都市活動の分析、予測に関する研究を整理すると共に、気候変動が都市活動に与える影響を考察し、気候変動と都市活動の相互影響を分析するための枠組みを検討した。気候変動に関する分析は全球を対象としており、GHG濃度が重要なドライビングファクターであることから、都市活動が気候変動に与える影響は現在の気候分析のフレームに入力しやすいことを示した。一方、データ制約や計算量の観点から全世界を対象とした都市空間の分析には簡便なモデルが必要なこと、気象災害の影響分析には高解像度の気候変動影響の入力が必要なことなど、都市の分析にはいくつかハードルがあることを示した。また、水資源量の変化や気象災害リスクの影響評価には、適応策に関するコストやGHG排出などの評価に工夫が必要なことも示した。

Key Words : *climate change, urban activities, global land use model*

1. はじめに

現在、54%である世界の都市人口比率は2050年には69%に達すると推計されている。世界規模での都市拡大は、気候変動を含む深刻な環境問題をもたらすと懸念される一方、気候変動は降水パターンの変化や海面上昇等をもたらす。都市活動に影響する。すなわち、気候変動と都市活動は相互に影響しており、特に長期的な気候変動政策、都市政策を検討する上では、両者の相互影響の考慮が不可欠と言える。

相互影響を捉えるには、気候変動は全世界の温室効果ガス排出の影響を受けることから、個別の都市を対象とするのみでは不十分であり、全世界の都市を対象とする必要がある。一方、気候変動の影響は地点によって異なるため、集計的に捉えるだけでは適切ではなく、個別の都市レベルでの影響把握が必要である。すなわち、これまでの気候分析で行われていたように、一定の空間解像度で全球レベルの分析が都市活動についても求められるといえる。

しかし、全球レベルでの都市活動に関する研究はごく限られており、また、気候変動との相互影響を捉えた研究も見られない。本稿では、全世界を対象とした都市の分析、予測に関する研究を整理すると共に、気候変動が都市活動に与える影響を考察し、気候変動と都市活動の

相互影響を分析するための枠組みを検討する。

2. 全球レベルの都市分析

温暖化対策評価を目的として、全世界の人口の長期的な空間分布の推計手法が研究されている¹⁴⁾。これらは全球の陸域をグリッドに分割し各グリッドの人口あるいは土地利用を推計するが、その方法はアドホックなルールベースのシミュレーションかモンテカルロ法によるシミュレーションであり、それらの理論的、実証的妥当性の検証は不十分である。Kii et al.⁵⁾は経験的な都市規模分布を理論的に保証する人口推計手法としてPreferential attachment modelを開発し、世界3万都市圏の2100年までの人口を推計したが⁶⁾、環境資源制約や居住者の生活の質を考慮しておらず、そうした生活の質が都市人口に及ぼす影響を考慮していない。また、あくまでも国レベルでの都市人口を各都市に配分するモデルであり、都市の空間分布等は考慮していない。

居住者の立地、交通行動を表現する土地利用交通統合(LUTI)モデル⁷⁹⁾は土地資源制約下での都市活動の空間分布を詳細に分析することが可能だが、要求データが多く、適用は特定の都市圏にとどまる。紀伊・中村¹⁰¹⁾はAlonso¹²⁾の単一中心都市モデルをベースとして世界約

3600都市の都市面積と人口密度を求めているが、これは上述のpreferential attachment modelに基づき推計された都市人口と整合的な都市面積を求めているに過ぎず、LUTIモデルのような地理制約や都市基盤の整備状況を考慮した人口や都市活動の空間分布を求めているわけではない。

全球レベルの都市域推計モデルの中で、Seto et al.⁴⁾は、各グリッドの都市の適合性に基づく都市的土地利用の確率的割り当てを行っている。そのベースモデルであるGEOMOD¹³⁾の考え方はシンプルであり、ある地域で総量として与えられた土地利用は、その適合性の最も高いグリッドから割り当てられると仮定している。この適合性には交通基盤の影響や市街地の自己相関を含むことも可能であり、LUTIモデルと比較して簡便に土地利用の空間分布を推計することが可能となる。その際、総量を与える地域が狭いほど、結果として得られる市街地の空間分布の蓋然性は高いと考えられる。ただし、狭い地域になるほど市街地面積総量の推計誤差は高まると考えられることから、市街地面積の推計精度とその空間割り当ての妥当性の間には、対象空間の範囲に関してトレードオフの関係があると言える。前述の世界の都市圏毎の面積推計が一定の妥当性を有しているならば、国レベルで推計された市街地面積を適合性に基づき個別グリッドに割り当てるよりも、市街地の空間分布の推計結果はより妥当なものになると考えられる。

なお、都市活動の空間分布は、人口や所得により大きく影響を受けるが、一般に人口や所得を内生化し、かつ実証分析に耐えうる都市モデルの開発は困難である。特に、気候変動政策で考慮されるような100年に渡る超長期的なタイムスケールでの人口予測や経済活動予測は、現在の科学では不可能であろう。こうした困難は都市モデルのみならず、気候変動の影響分析でも広く認識されており、このため、社会経済状況に関する共通の条件設定として、いくつかの幅を持ったシナリオが作成されており、それに基づき分析がなされている。

全球レベルの超長期都市分析では、そうしたシナリオ整合的な方法論が必要と言える。上述の既往研究^{14,10,11)}は、基本的には社会経済シナリオの空間的ダウンスケーリングと、それと整合的な都市活動の空間分布を求めるものである。未考慮の要素の取り込みやモデルの精緻化など、方法論としての更なる改善が必要ではあるが、気候分析に用いる都市活動モデルとして、一つの方向性を示していると言えよう。

3. 気候変動の都市活動への影響

都市域での気候変動影響ならびに適応策評価については膨大な研究蓄積があり、主要な研究はIPCC第5次評価

報告書の第二作業部会の8章¹⁴⁾にまとめられている。報告書では、人口が集中する都市部での気候変動影響は特に考慮すべきであり、気候変動に伴い海面上昇、高潮、熱波、豪雨、洪水、地滑り、干ばつ、水不足、大気汚染等のリスクが増大し、これらは、水供給、エネルギー供給、公衆衛生、交通と通信などの社会基盤や建設環境、生態系に深刻な影響をもたらすとしている。一方で、こうしたリスクに対する適応策は都市の成長と変革を促進する機会であるとしている。

これらの影響を見ると、特に水に関連する項目が多いが、その都市への影響は複雑である。例えば、降水パターンの変化は場所により干ばつをもたらすうるが、これは都市の飲料水への影響のみならず、農村部での農業生産の低下を通じて、食料価格や食料安全保障、および都市部への人口移動をもたらすうるとしている¹⁵⁻¹⁷⁾。また、海面上昇は高潮被害の程度や頻度を高め、居住者や固定資産、生態系等に影響をもたらす。また、港湾施設や沿岸部の産業設備への被害も拡大するとされている。

適応策については、条件が気候変動影響や所得水準で都市によって大きく異なるため、一概に示すことは困難とされている。低所得国では水資源の確保や気象災害に対応するための十分な投資を行う余力がないため、より脆弱であることが指摘されている¹⁸⁾。一方で、十分な投資が可能ならば、防潮堤の建設は、沿岸部の気象災害を回避する費用対効果の高い手段とする研究もある¹⁹⁾。水供給については所得の高い国では広域での水資源管理²⁰⁾、また、特に水資源が不足している国では海水淡水化等を通じて需要に対応しているが、これらはエネルギー集約的であり、特に後者については温室効果ガスの増大をもたらす²¹⁾。

4. 気候変動と都市活動の相互影響の分析枠組み

都市はGHG排出の主要な場所であると共に、気候変動への適応が求められる場所でもある。その適応策は条件によってはGHG排出を増大させるため、気候変動と都市活動には相互影響がある。気候変動は降水パターンや気温を変化させ、都市部の水資源利用コストや食料コストに影響を与える可能性がある。また、高潮等のリスクの増大は都市に固定された資本の劣化や土地資源の減少をもたらす。それらは都市活動のコストを増加させるが、その影響は気候変動が空間的に偏在するため、全世界で一様ではなく都市により異なる。また、それらの影響への適応策として様々な手段が存在するが、導入方法によっては都市活動のコストを増加させると共にGHG排出の増加要因ともなる。

すでに都市化が進んでいる高所得国での緩和・適応策

の検討とともに、今後大規模な都市化が進展する途上国において、緩和と適応のバランスをとりつつ持続可能性の向上を検討する上で、こうした気候変動と都市活動の相互影響を考えることの必要性は高いと考えられる。都市のGHG排出量には都市構造が影響するが、都市構造は一度形成されると改編は容易ではない。このため、今後成長する途上国都市において環境親和型の都市構造を誘導しうるかが、気候変動を介して都市活動のコストにも影響することになる。

環境・資源制約と生活の質の両立可能性は、当然のことながら人口や経済発展段階等の諸条件で異なる。また、気候変動の影響は地域に偏在し、水、土地等の資源量に影響する。気候変動に伴う課題の都市での表出と都市対策の気候変動への効果・影響を整合的に分析する方法論はこれまで研究蓄積が不十分である。近年のリモートセンシングデータやCreative Commons License等のオープンデータの蓄積はこうした実証分析を可能としつつある。

こうした相違考慮し分析するためには、気候変動影響および都市活動の空間的な偏在を明示的に考慮することが必要である。Atmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM) は将来気候を予測するモデルであり1度~5度程度の空間分解能で将来気候をシミュレーションしている。その結果はCMIP5により入手可能である。一方、都市的土地利用については、1kmグリッドで予測した研究も見られるが⁴⁾、土地被覆の適合性に基づく確率的な割り当てであり、影響評価に用いる上では解釈が必要となる。また、この研究ではインフラ整備等の都市政策の影響を考慮することはそのままでは困難である。

一方で、LUTIモデルを全世界の都市で適用することは現状のデータ制約の下ではあまり合理的とは言えない。LUTIモデルよりも簡便に都市活動の将来推計と都市政策の効果の分析が可能な空間モデルが必要である。

こうした空間モデルが開発されれば、人口配置や都市基盤、建物資本等の空間分布に展望を与え、そこで消費される交通、民生等のエネルギー需要の推測に役立てられる。特に、人口や都市活動の密度は、これらのエネルギー需要に影響することが知られており、全世界の都市を対象とした分析が求められる。

また、推計された都市的土地利用を海面上昇による高潮の被害リスク等と重ね合わせることにより、都市の脆弱性を評価できると共に、堤防等の整備効果を推計可能にもなるだろう。また、気候シナリオに応じた極端気象の発生確率等が評価可能となれば、内陸型の洪水についても分析可能となりうる。GCMによる降水パターン変化から流域毎の利用可能な水資源量の変化を把握できれば、水ストレスを把握することが可能となる。これは、生活の質への影響のみならず、水供給のコストとそれに伴うGHG排出にも影響するであろう。これら適応策の

実施可能性はコストと支払い能力に依存するが、大規模に導入されれば、それがGHG排出をもたらす、気候変動にフィードバックされることになる。適応策と緩和策の総合的な検討のためには、各種シナリオをこうした相互作用システムの下で評価することが必要と考える。

5. おわりに

本稿では、気候変動と都市活動の相互影響の地球規模での分析を目指し、これまでの都市分析と気候変動の都市活動への影響に関する既往研究を概括した上で、分析枠組みのコンセプトを検討した。気候変動分析は全球スケールで行われており、またGHGの効果は濃度に基づくため、都市活動が気候変動に与える影響は現在の評価フレームに乗せやすいと考えられる。一方、気候変動が都市活動に与える影響を分析するには、全世界を対象とした都市の空間モデルが必要なこと、気象災害の詳細評価には高解像度の気候変動影響の入力が必要なことなど、いくつかハードルがある。また、水資源量の変化や気象災害リスクの影響評価には、適応策のコスト評価やGHG排出への影響評価などの工夫が必要である。今後は、これらを考慮した総合的評価方法の構築を目指す。

謝辞：本研究は科研費（15H02869）の助成を受けている。

参考文献

- 1) Grüber, A., O'Neill, B., Riahi, K., Chirkova, V., Goujona, A., Kolpa, P., Prommera, I., Scherbova, S., Slentoe, E., 2007. Regional, national, and spatially explicit scenarios of demographic and economic change based on SRES. *Technological Forecasting and Social Change*, 74, 980–1029.
- 2) Gaffin, S.R., Rosenzweig, C., Xing, X., Yetman, G., 2004. Downscaling and geo-spatial gridding of socio-economic projections from the IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES). *Global Environmental Change*, 14, 105–123.
- 3) Asadoorian, M. O., 2008. Simulating the spatial distribution of population and emissions to 2100. *Environmental and Resource Economics*, 39, 199–221.
- 4) Seto, K. C., Güneralp, B., Hutyra, L. R., 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 16083–16088.
- 5) Kii, M., Akimoto, K. and Doi, K.: Random-growth urban model with geographical fitness, *Physica A*, Vol. 391, pp. 5960–5970, 2012.
- 6) Kii, M. and Doi, K.: Projecting global urbanization and the growth of megacities, In: Mackett, R., May, A. D., Kii, M.

- and Haixiao, P. (Eds.), *Sustainable Transport for Chinese Cities*, Emerald Group Publishing, Bingley, WA, pp. 17-42, 2013.
- 7) Anas, A. and Liu, Y.: A regional economy, land use, and transportation model (RELU-TRAN): Formulation, algorithm, design and testing, *Journal of Regional Science*, Vol. 47, pp. 415-455, 2007.
 - 8) Ueda, T., Tsutsumi, M., Muto, S. and Yamasaki, K.: *Computable Urban Economic Models in Japan*, EASTS-Japan Working Paper Series, No. 09-4, 2009.
 - 9) Yamagata, Y. and Seya, H.: Simulating a future smart city: An integrated land use-energy model, *Applied Energy*, pp. 1466-1474, 2013.
 - 10) 紀伊雅敦, 中村一樹: 世界の都市拡大のモデル化と将来推計の試み, *土木学会論文集 D3*, Vol.72, No.1, pp. 25-33, 2016.
 - 11) Masanobu Kii, Kazuki Nakamura: Global urban land use modeling to test its sensitivity of urban expansion to housing and transportation technology improvement, the 14th International conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (CD-ROM), 2015.
 - 12) Alonso, W., 1964. *Location and land use*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
 - 13) Pontius, R.G., Cornell, J.D., & Hall, C.A.S., *Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: Application and validation with Costa Rica*, *Agriculture, Ecosystems, and the Environment*. Volume 85, Pages 191-203, 2001.
 - 14) Revi, A., D.E. Satterthwaite, F. Aragón-Durand, J. Corfee-Morlot, R.B.R. Kiunsi, M. Pelling, D.C. Roberts, and W. Solecki, 2014: Urban areas. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 535-612.
 - 15) Vairavamoorthy, K., S.D. Gorantiwar, and A. Pathirana, 2008: *Managing urban water supplies in developing countries – climate change and water scarcity scenarios*. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(5), 330-339.
 - 16) Herrfahrdt-Pähle, E., 2010: South African water governance between administrative and hydrological boundaries. *Climate and Development*, 2(2), 111-127.
 - 17) Farley, K.A., C. Tague, and G.E. Grant, 2011: Vulnerability of water supply from the Oregon Cascades to changing climate: linking science to users and policy. *Global Environmental Change*, 21(1), 110-122.
 - 18) IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.
 - 19) Hinkel, J., D.P. van Vuuren, R.J. Nicholls, and R.J.T. Klein, 2013: The effects of mitigation and adaptation on coastal impacts in the 21st century. An application of the DIVA and IMAGE models. *Climatic Change*, 117(4), 783-794.
 - 20) WMO, 2008: *Future Climate Change Research and Observations: GCOS, WCRP and IGBP Learning from the IPCC Fourth Assessment Report*. Workshop and Survey Report, IGBP Report No. 58 (WMO/TD No. 1418), Global Climate Observing System (GCOS) Secretariat, World Climate Research Programme (WCRP) Joint Planning Staff – World Meteorological Organization (WMO), and the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) Secretariat, WMO, Geneva, Switzerland, 57 pp.
 - 21) McEvoy, J. and M. Wilder, 2012: Discourse and desalination: potential impacts of proposed climate change adaptation interventions in the Arizona-Sonora border region. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions*, 22(2), 353-363.

(2009.7.1 受付)

INTERACTION BETWEEN CLIMATE CHANGE AND URBAN ACTIVITIES - FRAMEWORK FOR THE ANALYSIS AND OUTLOOK-

Masanobu KII

In this article, we reviewed the literatures for global urbanization analysis, examined the impact of climate change on the urban activities, and discussed the analytical framework for the interaction of climate change and urban activities. The climate change is analyzed at global scale and the major driver is green house gas concentration in global average, therefore it would be relatively easy to reflect the impact of urban activities on the climate change. On the otherhand, a novel and simple approach for urban spatial analysis would be needed for the global scale projection of urban activities. Additionally, the impact analysis of meteorological disasters on urban activities may requires higher spatial resolution of the meteorological input. For the evaluations of water resource and meteorological disaster risk, further studies for the evaluation of adaptation cost and green house gas emissions are needed.