

審査の結果の要旨

氏名 ミスラ プラカル

本論文は、インド大都市の大気質に及ぼす社会経済成長と土地利用変化の影響分析に関する学術論文である。

現在、世界人口の 50%以上が都市部に住んでおり、国連の見通しによると、経済成長によって 2070 年までに 70%までの人口が都市部に居住すると考えられている。1990 年以来、バングラデシュ、中国、インドなど、急速に発展している発展途上国の人口密度の高い大都市では、PM_{2.5} などの大気汚染物質が少なくとも 20%上昇したと報告されている。こうした大気汚染に起因する死亡者数は、2010 年には 200 万人であったが、アジア諸国を中心に 2050 年には 430 万人に増加するとされている。このような背景のもと、効果的な政策を立案するためには、大気汚染の原因となる排出源に対する定量的な理解が重要となる。IPCC AR5 の報告書によると、社会経済開発と各国の排出との関連について統計的な指標を算出しているが、国内総生産(GDP)と人口増加の影響、エネルギー消費と排出量の予測にはなお改善の余地が残るとされている。特に、発展途上国の都市域において、社会経済開発が都市の大気質に与える影響分析は、利用可能な観測データが不十分であることが阻害要因となり、中国など一部の国を除いては、研究が進んでいない。

本研究では、世界の大気汚染都市 20 カ所の半数が存在するインドの都市に焦点を当て、特に被害が深刻とされる、5 つのメガシティ、ニューデリー、ムンバイ、コルカタ、バンガロール、チェンナイを対象に、性能の異なる衛星リモートセンシングデータを複合的に活用して、社会経済的要因と土地利用変化の成長が、都市の大気質にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることを目的とする。本研究の流れは、大きく次の 4 つに分かれる。i) MODIS センサーを用いて 2001 年から 2016 年までの都市部の人為的エアロゾルに起因する大気汚染監視手法を確立する、ii) エアロゾル、SO₂ および NO₂ などの大気汚染物質と、人口、GDP、都市域の面積と建物割合、夜間光のデータとの関連分析を行う、iii) 2001 年から 2015 年までの都市の土地利用を、住宅、商業、工業地域の 3 地域に区分し、1 人当たり GDP と人口増加との関係を明らかにする、iv) 排出源の拡大と技術開発を考慮した人為的エアロゾル排出モデルを構築する。

リモートセンシングデータとして、MODIS の大気の光学的厚さ(AOD)、オングストローム係数(α)、OMI の SO₂ および NO₂ の鉛直濃度、DMSP/OLS および VIIRS DNB からの夜間光データセット、AW3D30 および ASTER GDEM からのデジタル標高モデ

ル、ALOS2/PALSAR2の後方散乱係数、Landsat7と8の正規化植生指数(NDVI)を使用した。まず、MODISのAOD、 α の散布図の関係から、都市域の大気質を、AirRGB(赤緑青)の3成分として定義した。すなわち、a) R(AODと α がともに高い)、b) G(AODが低く α が高い)、c) B(AODが低く α も低い)に分解する手法を開発した。3成分RGBのうち、粒子径が小さく(α が大きい)、AODの濃度が高いRが、バイオマス燃焼、工場からの煤煙、交通からの排出など人為的なエアロゾルの排出を表現することができる。2001年から2016年までの長期変動を観察したところ、インドのほとんどの都市で正のR傾向(勾配0.04)を持ち、特に2009年以降に上昇傾向を持つことが明らかとなった。次に、インドの大都市でのPM_{2.5}排出量増加の原因を解明するために、AirRGB R、SO₂、NO₂と、人口、GDP、建物が密集する地域での校正された夜間光との相関を調べた。人間の経済活動を示す夜間光は、2001年から2014年にかけて人為起源のエアロゾル濃度と正の相関関係が認められた。一方で、SO₂とNO₂では、これとは逆に負の相関関係が認められた。これは、建設活動や自動車排出ガスの寄与は、空間的に広範囲に分散することによるものと考えられる。また、AirRGB Rは、大気汚染の深刻なほとんどの行政区界において、GDPのうち建設業および産業活動を示す統計指標と一方向性または双方向性のGranger因果関係が確認された。

次に、3次元デジタル表層モデルとして2001年のASTER GDEM、2011年のAW3D30を、校正された夜間光データセットを用意し、機械学習の一つであるサポートベクターマシン分類を用いて、従来の土地利用図を3次元に拡張した土地利用分類を実施した。その結果、住宅、商業および工業地域を区分した30m解像度の3次元土地利用情報を作成することができ、デジタル表層モデルの解像度と建物の密集度に大きく依存するものの、カッパ係数で57%程度の精度が得られることが明らかとなった。3次元の土地利用情報と人口、GDPとの関係を分析したところ、中規模都市の土地利用の拡大は人口規模に依存しているのに対し、大都市圏の土地利用の拡大は、1人当たりGDPの影響が支配的であることが明らかとなった。

最後に、2001~2015年のAir RGB Rデータに階層的なベイジアン・フレームワークを用いることにより、住宅、商業および工業地域、バイオマス燃焼、レンガ工場、交通を代表する土地利用分類図を説明変数に、大気汚染に対する排出係数を定量的に算出した。Air RGB Rが雲の影響を受けずに季節変動をよくとらえている場合、モデルは良好な再現性を示し、住宅地からの排出はAirRGB Rの濃度の28%と最も大きく寄与しており、レンガ工場が6%、交通が5%の寄与率を持つことが明らかとなり、住宅地からの排出削減が重要であることを示唆された。

発展途上国では、都市の大気質と排出源インベントリを評価するための計測データが

驚くほど少ない中、性能の異なる複数の衛星計測から得られる可視赤外の反射率、ステレオ計測、夜間光などのデータセットを用いて、大気質に関する長期データセット、土地利用、建物の高さ、に関する情報を網羅的に収集し、これらを効果的に組み合わせ、統計的なモデリングを行うことにより、インドの大都市を対象とした大気質の劣化要因を GDP、人口と行った社会経済的要因と土地利用変化の成長との関係を明らかにし、排出源の拡大と技術開発を考慮した人為的エアロゾル排出モデルを構築した。従来の手法に比べて広域に大気質の成分を分解することにより、複数の排出源からの放出量を定量的に評価が可能になる点で、本研究で提示する手法は優位性が認められる。また、大気質に関する情報が得られにくい他の発展途上国の大都市にも応用可能な、中長期的な排出源インベントリ作成、削減のための定量的評価と計画に組み込むことのできる一連の手法とデータセットを開発した点で、工学的な有用性も高く評価することができる。

よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。