様　式　C－19、F－19－1、Z－19　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　　元 年　　6 月 14 日現在

機関番号：12102
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2016～2018
課題番号：16K12816

研究課題名（和文）東南アジアのメガシティにおけるアーバン・ボリュームと生態系サービスの変容

研究課題名（英文）Changes in the urban volume and ecosystem services in megacities in Asia

研究代表者
村山　祐司（Murayama, Yuji）

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：30182140

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,600,000円

研究成果の概要（和文）：　都市化に伴う複雑な空間構造の変容を解き明かすには，水平的・垂直的土地利用の変化を一体的に把握する視点が重要である．この研究では，水平的・垂直的都市化をアーバン・ボリュームの観点から捉え，メガシティの総合的な都市力や持続的な発展を測る指標としてこの概念の有効性を示した．本指標は，人工建造物の容積だけでなく，都市内に点在する緑地の面積や容積も把握できるので，環境保全を重視する生態系サービス研究に多大な貢献が期待できる．アジアにおけるメガシティを対象に実証分析を実施し，持続可能なメガシティ発展をめざす効果的な政策・計画を探求した．

研究成果の学術的意義や社会的意義
メガシティの水平的拡大については多くの研究事例があるが，垂直的な拡大およびその機能的動態については蓄積が乏しい．GISとRSの技術を援用して，DEM，DSMデータからアーバン・ボリュームを導く試みは，これからの都市化研究に新たな地平を開くことが期待される．都市内の公園やオープンスペースに限らず緑地資源の容量（体積）を算出し，それをもとに生態系サービスの変化を明らかにするという視点は従来の研究にはみられない．
衛星画像データは国境を超え広範囲を同一条件で入手できるので，この概念をプラットホームに，緑地保全を重視したメガシティの持続的発展をテーマとする国際共同研究を組織することも可能になる．

研究成果の概要（英文）：　The systematic geographical approach of horizontal and vertical urban development is necessary to understand the changes and mechanism of complicated urban structure in mega-cities. In this connection, this study tried to develop the urban volume index based on the land use and cover for catching the functional transformation of green space and build-up space. Using urban volume index, this study conducted the geo-spatial analysis of rapidly growing mega-cities in Asia and discussed the usefulness for the urban policy and planning in the near future.

研究分野：地理学

キーワード：アーバンボリューム　GIS　アジア　都市発展　生態系サービス　リモートセンシング　地理空間分析　地理学

様　式　Ｆ－１９－２

１．研究開始当初の背景

21 世紀に入り，先進諸国では都市への人口流入は止みつつあるが，発展途上諸国では都市化が依然として続いている．とくに東南アジアではメガシティへの人口一極集中が加速し，首位都市卓越性が年々深化している．人口集積がもたらす過剰都市化は，空間的には都市的土地利用の水平的・垂直的拡大をもたらし，過密な都市空間を作り出している．メガシティの都心部（CBD）や副都心，郊外核では，外資系企業の進出により高層オフィスや居住用マンションの集積が進んでいる．その一方，伝統的な低層住宅，不良住宅，オープンスペース，空き地などは急速に姿を消しつつある．都市化前線地帯では，樹木などが切り倒され，自然環境が急速に悪化している．都心部では，交通混雑，大気・水質汚染，地価の高騰などが生起し，生活・居住環境の悪化が懸念される．都市化に伴うこれら複雑な空間構造の変容を解き明かすには，水平的・垂直的土地利用の変化を一体的に把握する視点が必要である．

２．研究の目的

この研究では，水平的・垂直的都市化をアーバン・ボリュームの観点から捉え，メガシティの総合的な都市力や持続的な発展度を測る指標としてこの概念の有効性を示す．人工建造物の容積だけでなく，都市内に点在する緑地の面積や容積も把握できるので，環境保全を重視する生態系サービス研究に多大な貢献が期待できる．東南アジアにおけるメガシティを対象に実証分析を行い，シナリオ・シミュレーションによって将来のアーバン・ボリュームを予測するとともに，持続可能なメガシティ発展をめざす効果的な政策・計画を探求したい．

本研究の課題の第一は，建造物や樹木の高さ・容積を高精細な衛星画像から自動的に取得する手法を開発するとともに，メガシティが有する「総合的都市力」を客観的に評価する方法を確立することである．本研究で提案するアーバン・ボリューム概念は，建造物の容積と緑地の容積の総和として定義される．この概念の導入によって，「建造物の容積の変化で示される経済発展」と「樹木・草地の面積・容積の変化で示される自然環境の維持」というトレードオフ関係を定量的に考察可能になる．東南アジアのメガシティが今後快適で持続的な発展を遂げるためには，この 2 つの要素がバランスよく維持されていかねばならない．

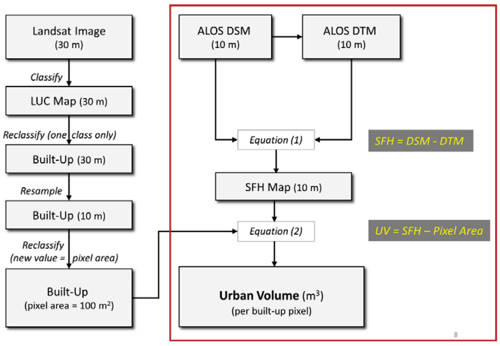
本研究の課題の第二は，先進国の経験を踏まえ，都市化による緑の喪失の程度を定量的に捉え，緑地の減少がメガシティの居住環境やアミニティにどんな影響を与えるかを探ることである．研究を通じて，都市内の生態系サービスの変化を明らかにし，今後の都市政策に資する材料を提供したい．今後，東南アジアでは，生活者中心社会を見据え，健康，安全・安心，アメニティなど居住環境を重視した都市政策が求められる．

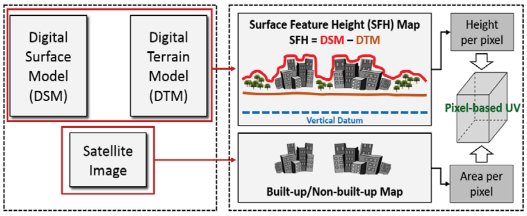
３．研究の方法

メガシティの水平的拡大については多くの研究事例があるが，垂直的な拡大およびその機能的な動態については蓄積が乏しい．都市内の公園やオープンスペースなどの面積だけでなく緑地資源の容量（体積）を算出し，それをもとに生態系サービスの変化を明らかにするという視点は従来の研究にはみられない．GIS とリモートセンシング（RS）の技術を援用して，DEM データ，DSM データからアーバン・ボリュームを導く試みは，これからの都市化研究に新たな地平を開くことが期待される．国連が主導する Future Earth 研究では，アジアにおける生態系サービス研究が重要な柱に位置づけられている．衛星画像デ

ータは国境を超え広範囲を同一条件で入手できるので，この研究が実を結べば，アーバン・ボリューム概念をプラットホームに，緑地保全を重視したメガシティの持続的発展をテーマとする国際共同研究を組織することも可能になる．

発展途上地域では過去にさかのぼって大縮尺の地図や統計を得ることが難しく，都市化プロセスの時空間的な把握は困難を伴う．センサスにしても小地域単位でデータが整備されておらず，精緻な時空間分析は不可能であった．しかし近年，高精細衛星画像が安価に入手できるようになり，DEM・DSM データを用いて時空間的に水平的・垂直的都市化を分析可能な研究環境が整いつつある．本研究では，アーバン・ボリュームを建造物群と樹木・草地群に分けて算出し，都市の経済的発展と都市の居住快適性を別々に評価できる手法を考案する（図参照）．





オフィスやマンションなどの高層化は経済発展の証であり，その容積や機能を把握することによって，当該メガシティにおける経済力の推移/向上を客観的に捉えられる．一方，農地転用や樹木の伐採といった緑地の減少は，アメニティ，生活魅力度の低下を招くと考えられる．東南アジアにおいて，緑地環境の維持・保全は喫緊の課題に浮上しており，学術的には生態系サービスの価値を科学的に測る手法を開発することが要請されている．メガシティの持続的発展のためには，緑を喪失させてはならない．生態系サービスの価値を都市別に比較した研究は，管見するところみられない．2014 年から国際科学会議(ICSU)や国際社会科学協議会(ISSC)などが中心となり，社会の幅広い関係者（ステークホルダー）と協働で，地球環境の保全と持続可能な地球社会の実現をめざす国際プログラム Future Earth が進められ，そのなかで生態系サービス研究は重要課題に位置づけられている．この挑戦的萌芽研究はこの国際プログラムの目的にも合致している．

建造物や樹木の高度の算出や３Ｄ解析の技法は日進月歩で進んでいるので，地理情報科学，リモートセンシング，写真測量学，地図学，地形学など諸分野の国際誌を中心に方法論や実証研究の成果を渉猟し，本研究に最適な分析枠組を構築した．高さ情報の取得には，東南アジアのメガシティ群を空間的にカバーする ALOS 画像を使用した．土地利用の水平的拡大の解析には LANDSAT 画像を用いた．このデータは，メリーランド大学から入手した． 本分析では，過去 15 年間の土地利用分類図を作成し，IDRISI を援用して 2030 年の土地利用パターンを導出した．ついで，土地利用構成割合の変化をもとに生態系サービス価値（ESV）の変容を考察した．

アーバン・ボリュームの算出については， DSM と DEM の差分から高さを導き，床面積を掛け合わせて容積を求めた．土地利用の分類は，30m解像度の LANDSAT データにニューラルネットワークを用いた教師付分類を適用した．

４．研究成果

平成 28 年度：建造物や樹木の高さ・容積を高精細衛星画像から自動的に取得する手法を開発するとともに，それを用いてメガシティが有する「総合的都市力」を客観的に評価する方法を確立した．本年度の前半は，従来の研究を系統的に渉猟しながら，リモートセンシングと地理情報システムを援用してアーバン・ボリュームを導出する手法の構築に努めた．農地転用や樹木の伐採といった緑地の減少は，アメニティ・生活魅力度の低下を招き，都市の活力を弱める遠因と考えられる．

本年度の後半は，生態系サービスに関する従来の研究をサーベイし，その予測モデル構築の可能性を検討した．ついで，メガシティを対象に実証分析を行って，実際のアーバン・ボリュームを求めるとともに，エコシステムの変動を分析した．なお，土地利用の分類は，30m解像度の LANDSAT データにニューラルネットワークを用いた教師付分類を適用し導いた．小集落レベルにおいて，個々の建物や施設のボリュームを建物毎に測定するとともに，緑地のボリュームを測定することを目的に，ドローンを援用したフィールドワーク実験を実施した．その結果，建物や木々の高さが正確かつ効率的に測定できることがわかり，ミクロレベルにおける本手法の有用性を確認した．アーバン・ボリューム概念を導入することによって，「建造物の容積の変化で示される経済発展」と「樹木・草地の面積・容積の変化で示される自然環境の衰退」というトレードオフ関係を定量的に把握できることが明らかになった．

平成 29 年度：平成 28 年度の研究で確立したアーバン・ボリュームの測定手法を６つのメガシティに適用し，実証研究を行った．対象とした都市は，東京，北京，上海，スラバヤ，つくば，ルサカである．利用データは，ALOS PRISM DSM である．実際の高層建築物における床面積および高さを測定しアーバン・ボリュームを導出するとともに，衛星画像から自動的に導いた高層建築物のアーバン・ボリュームとを比較し，そのずれを検証した．その結果，どの都市でも十分満足できる適合度を得ることができ，手法としての有効性を確認した．しかし，詳細に検討してみると，北京とルサカの適合度は他の 4 都市と比べて適合度が落ちることが回帰分析により判明した．緯度経度や都市構造，建物密度などが関係していることが示唆され，より科学的に検証が必要なことが明らかになった．

本年度の後半は，とくにスラバヤを対象に，建築物のボリュームと緑地帯のボリュームの構成比が都市内地区によってどのように異なるかを解明するとともに，その要因分析を行った．持続的発展に向けて，緑地帯のボリュームをいかに増やしていくかは重要な政策課題であり，本分析の結果は将来の都市計画の基礎資料として貢献できると考えられる．この研究の成果は，国際学術雑誌 Sustainable Cities and Society の 39 巻（2018）に Estimation of built-up and green volume using geospatial techniques: A case study of Surabaya, Indonesia のタイトルで発表した(共著)．

平成 30 年度：　３年間における実証分析の成果を踏まえ，アーバン・ボリュームに関する理論的・定量的な検討を行い，東南アジアにおけるメガシティの事例研究を通じて指標としての有効性を検証した．インドネシアのスラバヤ市を事例とした研究では，構築した指標を用いてアーバン・ボリュームを算出するとともに，建物のボリュームと緑地のボリュームを分離する方法を提案した．さらに，その経年的変化を追尾し，アーバン・ボリュームがどのように変容するのかを空間可視化し，その要因を探った．近年のスラバヤでは，市当局の緑地政策が功をなし，緑地のボリュームが増加傾向に転じ，住民にとって快適な都市環境が醸成されつつあることが明らかになった．

ついで，データが整備されている日本の地方都市を事例として（土浦市，つくば市），アーバン・ボリュームをより精確に測定する手法を開発し，実証分析によりその有効性を検証した．建物のボリュームでは，床面積と高さを正確に測定することが重要であるが，これは，ALOS 衛星画像とデジタル住宅地図を併用することで，精度をかなり高められることがわかった．とくに DTM を正確に測定するために，建物まわりの微地形を捉え平均標高を自動的に導出する手法を確立した．この手法の有用性は，データの蓄積のある複数の地方都市で確認し，社会実装化できることを確かめた．さらに，本年度は，アーバン・ボリュームの増加とヒートアイランドの形成との関係に注目し，東南アジアの急成長都市群を対象に GIS/RS 分析を実施した．

アーバン・ボリュームとエコシステム・サービスとの対応関係については，張新民氏の協力を得て，近年都市化が著しい中国のメガシティを対象に，実証分析を行った．地理情報システムとリモートセンシングを組み合わせて，土地利用の将来予測を行い， 2030 年における生態系サービスとその貨幣価値を導きだした．張氏は，生態系サービスの価値を人口で除した H-ESV, および新都市域における生態系サービス価値の減少を全域の生態系サービス価値の減少で除した U-ESV という２つの指標を考案し,「過去から現在までの土地利用の変化が将来も継続する場合」と「環境保全を重視し，農地転用を抑制する場合」とで将来の生態系サービス価値がいかに異なるかを定量的に明らかにした．都市化が，周辺の森林や農業用地を減少させ，エコシステム・サービスの価値を低下させている実態が浮き彫りになった．ついで，シミュレーションによって生態系サービスの相対的価値を維持・向上させる方策を探った．シナリオ分析の結果，市当局による緑地環境保全の政策が欠かせないことが明らかになった．なお，生態系サービスに関する従来の研究の成果は，2019 年３月にレビュー論文として PLOS ONE, **14**(2), e0210707 に公表した．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 15 件）

(1)Zhang, X., Estoque, R.C., Xie, H., Murayama, Y., Ranagalage, M., Bibliometric analysis of highly cited articles on ecosystem services. *PLOS ONE*, 査読有, 14(2), 2019, e0210707. DOI: 10.1371/journal.pone.0210707

(2)Ranagalage, M., Murayama, Y. Measurement of urban built-up volume using remote sensing data and geospatial techniques. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, 査読無, **14**, 2018, 19-29.

(3)Estoque, R.C., Murayama, Y., Lasco, R.D., Myint, S.W., Pulhin, F.B., Wang, C., Ooba, M., Hijioka, Y., Changes in the landscape pattern of the La Mesa Watershed: The last ecological frontier of Metro Manila, Philippines. *Forest Ecology and Management*, 査読有, **430**, 2018, 280-290. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.08.023

(4)Handayani, H.H., Murayama, Y., Ranagalage, M., Liu, F., Dissanayake, DMSLB., Geospatial analysis of horizontal and vertical urban expansion using multi-spatial resolution data: A case study of Surabaya, Indonesia. *Remote Sensing*, 査読有, **10**(10), 2018, 1599. DOI: 10.3390/rs10101599

(5)Estoque, R.C., Pontius, R.G., Murayama, Y., Hou, H., Thapa, R.B., Lasco, R.D., Villar, M., Simultaneous comparison and assessment of eight remotely sensed maps of Philippine forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 査読有, **67**, 2018, 123-134. DOI: 10.1016/j.jag.2017.10.008

(6)Ranagalage, M., Estoque, R.C., Zhang, X., Murayama, Y., Spatial changes of urban heat island formation in the Colombo district, Sri Lanka: Implications for sustainability planning. *Sustainability*, 査

読有,**10**(5), 2018, 1367. DOI: 10.3390/su10051367

(7)Simwanda, M., Murayama, Y., Spatiotemporal patterns of urban land use change in the rapidly growing city of Lusaka, Zambia: Implications for sustainable urban development. *Sustainable Cities and Society*, 査読有, **39**, 2018, 262-274. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.039

(8)Handayani, H.H., Estoque, R.C., Murayama, Y., Estimation of built-up and green volume using geospatial techniques: A case study of Surabaya, Indonesia. *Sustainable Cities and Society*, 査読無, **37**, 2018, 581-593. DOI: 10.1016/j.scs.2017.10.017

(9)Ranagalage, M., Estoque, R.C., Handayani, H.H., Zhang, X., Morimoto, T., Tadono, T., Murayama, Y., Relation between urban volume and land surface temperature: A comparative study of planned and traditional cities in Japan. *Sustainability*, 査読有, **10**(7), 2018, 2366. DOI: 10.3390/su10072366

(10)Estoque, R.C., Murayama, Y., Monitoring surface urban heat island formation in a tropical mountain city using Landsat data (1987-2015). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 査読有, **133**, 2018, 18-29. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.09.008

(11)Estoque, R.C., Murayama, Y, Myint, S., Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 査読有, **577**, 2017, 349–359. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.10.195

(12)Estoque, R.C., Murayama, Y., A worldwide country-based assessment of social-ecological status (c. 2010) using the social-ecological status index. *Ecological Indicators*, 査読有, **72**, 2017, 605–614. DOI:10.1016/j.ecolind.2016.08.047

(13)Estoque, R.C., Murayama, Y., Ranagalage, M., Hou, H., Subasinghe, S., Gong, H., Simwanda, M., Handayani, H.H., Zhang, X., Validating ALOS PRISM DSM-derived surface feature height: Implications for urban volume estimation. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, 査読無, **13**, 201713-22.

(14)Estoque, R.C., Murayama, Y., Quantifying landscape pattern and ecosystem service value changes in four rapidly urbanizing hill stations of Southeast Asia. *Landscape Ecology*, 査読有, **31**, 2016,1481–1507. DOI: 10.1007/s10980-016-0341-6

(15)Hou, H., Estoque, R.C. and Murayama, Y., Spatiotemporal analysis of urban growth in three African capital cities: A grid-cell-based analysis. *Journal of African Earth Sciences*, 査読有,**123**, 2016, 381–391.DOI:10.1016/j.jafrearsci.2016.08.014

〔図書〕(計１件)

1)Murayama, Y., Kamusoko, C., Yamashita, A., Estoque, R.C. (Eds.) *Urban development in Asia and Africa – Geospatial analysis of metropolises.* Springer Nature, Singapore, 2017, 1-424.

〔その他〕
ホームページ等
Mega-cities Project: Urbanization in Major Asian and African Cities
http://giswin.geo.tsukuba.ac.jp/mega-cities/

６．研究組織

研究協力者（2017 年４月～）
エストケ・ロナルドシー(Estoque, Ronald C.)
筑波大学・生命環境系・研究員
研究者番号：　６０７６０１３９