

平成30年6月6日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420631

研究課題名(和文) 局所的な土地利用変化は長期的にみて都市気象に影響を与えるか

研究課題名(英文) Do local land use changes give effect to the urban climate for a long period?

研究代表者

客野 尚志 (KYAKUNO, TAKASHI)

関西学院大学・総合政策学部・教授

研究者番号：80322725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人口減少局面にある都市域における土地利用変化を予測するための数学モデルを開発した。このモデルは、条件付き空間的自己回帰モデルを階層ベイズにより拡張したものであり、周辺の都市化が注目している地区に与える影響力をランダム変数として扱った点に特徴があり、その変数の自由度については、事前分布の精度を調整することを通して制御した。適切な精度を設定することにより、周辺の都市化の影響を見積もることが可能になるだけでなく、他の都市化に関連する要素の影響をより適切に評価することができた。また得られた母数を用いて、土地利用変化のシミュレーションを実施し、将来の都市気象に対する影響についても評価した。

研究成果の概要(英文)：A mathematical model that predicts land use change in depopulating cities is proposed by use of the spatial model enhanced by Bayesian statistical model. The model is a modified form of the intrinsic Gaussian CAR model with Bayesian scheme, and considers intensities of effects of urbanization in surrounding areas as random variables in a stochastic way. In the model the intensities of the effects are regarded to vary randomly depending on their places but, on the other hand, controlled by the precision value of the prior distribution. It enables us to estimate not only the intensities of the effect but also effects of other important factors more accurately than the ordinal regression model.

Furthermore, future land use changes are simulated by using this model and parameters obtained from the preceding calculations, and possible future rises of temperature caused by the spread of urbanizations are estimated.

研究分野：建築学・都市環境学

キーワード：都市化 ヒートアイランド GIS 土地利用変化 ベイズモデル MCMC 条件付き空間的自己回帰モデル

1. 研究開始当初の背景

我が国では成熟社会を迎え、かつてのような大規模開発が減少し、郊外や臨海部のスプロール状の宅地開発がみられなくなった。代わって顕著となっているのが、敷地や街区単位での局所的な用途転換や空地化である。特に都心部ではこれが顕著であり、タワーマンションに代表されるような集合住宅の建設や、古い住宅地における空き家、空き地の増加など局地的な土地利用変化が目立つ。一方、近年の猛暑でも問題となるように、都市の気温上昇は都市のヒートアイランド問題として取り上げられ、例年、社会の耳目を集めている。この主たる原因は「都市化」と緑地や水面の減少であり、土地利用変化がこれらを加速させる主要因となっている。

局所的な土地利用変化については、かつてみられた大規模な土地利用変化と異なり、大規模な森林破壊や水面埋め立てを伴うことは少なく、その点で都市気象への影響については比較的限定的あるいは局所的にもみえる。しかし、実際には局所的な用途転換や空地化が長期的には周辺の土地利用変化に影響を及ぼし、それらが蓄積して、都市全体の気象にまで影響を与えるようになる可能性が十分にある。局所的な土地利用変化だからといってこれを看過するのではなく、それらが長期的に周辺土地利用にどのような影響を与え、その蓄積として最終的にどの程度の気象上の負荷を発生させるのかという点は、都市計画の重要な課題ともいえる。しかし、現在にいたるまでこの点はほとんど議論されておらず、学術的な蓄積も不十分である。

局所的な土地利用変化が周辺の土地利用に与える影響については、現在までいくつかの研究が存在する。特に近年流行しているセルラーオートマタやマルチェージェント、ニューラルネットワーク等のソフトコンピューティング手法により、従来の回帰モデルでは困難であった、近隣の相互作用を加味することが可能となり、さらに相互作用に基づいた複雑な挙動を追跡する上でこれらの手法が極めて有効であることが指摘されている^①。しかし、これらのモデルの多くは非線形で多くの交叉作用を含んでおり、直感的に土地利用変化の影響要因の大きさを突き止めることが困難であり、実務上では限定的な局面でしか利用できない。一方で、確率過程モデルに基づく土地利用変化のモデリングについては、研究の数は決して多くないものの土地利用変化の分野で大きな成果を上げており、その結果が時系列で表現され、さらに統計学の枠組みから結果の解釈が可能となるという利点をもつ^②。また、パラメータの設定とシミュレーション結果の関係が比較的明瞭で、一連の結果を実務の計画論に反映させることが容易な点も利点の一つである。この確率過程モデルをベースとして、さらに空間計量経済学の分野で発展してきた空間統計学の枠組みを活用することにより、モデルの線

形性を保持しつつ、周辺の土地利用の相互作用を加味したモデリングが可能となり、さらにシミュレーション結果を統計学の枠組みから議論、考察することが可能となると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、空間統計学の手法と、階層ベイズモデリングに基づく確率モデルを用いて、局所的な土地利用変化が長期的に周辺土地利用変化に与える影響を推定し、その上でこれらの蓄積が広域の都市気象に及ぼす影響を定量的に予測するための手法を開発することを目的とする。具体的には、次の3つの課題に取り組む。

- A. 局所的土地利用変化が周辺土地利用変化に与える影響力とその形成要因の解明
- B. 上記の影響力を適切に考慮し、局所的土地利用変化が長期的に周辺の土地利用変化として伝搬する確率モデルの定型化
- C. 局所的土地利用変化の拡散過程とそれが最終的に都市気象に対して与える影響の解明。

本研究の成果は、環境共生時代の都市政策、都市計画の立案に活用されることが期待される。

3. 研究の方法

(1)方法

本研究では成熟社会下の都市の土地利用変化の動向を説明、予測することを目的とすることから、これを如実に示す大阪、神戸、京都都市圏を対象地域として選定した。これらの地域において4次メッシュを抽出した。このうち、国勢調査のメッシュ統計などにおいて秘匿措置のある地区などを全て除去したものととして5794メッシュを選びだした。このメッシュのことを本研究ではGridと称し、このGridの中のセル(約120m四方)の土地利用の構成の変化を研究の対象とした。対象地域におけるGridの空間分布の様子を示したものが図1である。そして、各Gridの中の建物用地のセルが占める割合(パーセ

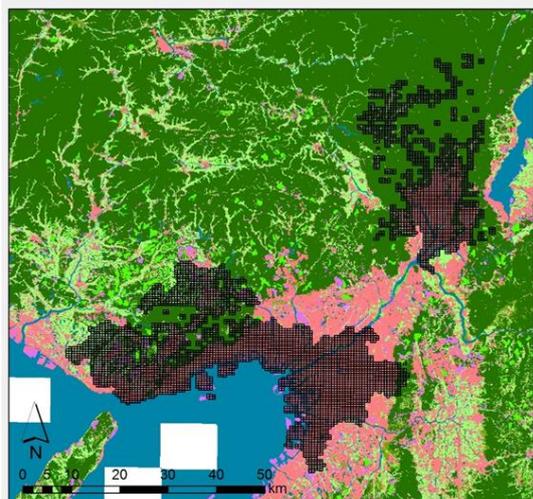


図1 研究対象領域とGridの分布*

ンテージ)が2006年から2009年の間に変化した量(ポイント)を算出し、そのポイントを目的変数と位置づけ、それを予測するための数理モデルを構築し、そのモデルをもちいて、将来の土地利用変化そしてそれに伴い発生する気温上昇の程度を予測する。

(2) 数学モデル

本研究で使用した数理モデルは、既存の条件付自己回帰モデルを独自に拡張し、改良したものである^④。この新しいモデルについて、本研究では拡張型条件付空間自己回帰モデル(Enhanced Intrinsic Conditional Autoregressive Model)と名づける(以降ランダム効果モデル)。このモデルの特徴は階層ベイズの構造を有していること、さらに通常の条件付き自己回帰モデルが自己回帰性を誤差項に内包しているのに対して、このモデルにおいては、自己回帰性が都市化圧を表現する項の係数に内包されている点にある。後者の点を詳しくのべると、周辺の都市圧がその地区に与える影響力は一定のものではなく、それは地区によりことなるが、しかしながら周辺の地区と一定の類似性を有するという考えを数学的に表現したものととらえることができる。

このモデルを数学的に記述すると次のようになる。ただし、このモデルにおいては切片項を0と仮定している。成熟社会において、全体として建設用地の変化の割合はバランスがとれていると仮定しているためである。

$$y_i = \sum_{j=1}^M \beta_j x_{ij} + \alpha_i p_i + \varepsilon_i$$

ただし $\varepsilon_i \sim \text{Norm}(0, \frac{1}{\tau})$

図2 数理モデルの概要(その1)

y_i : Grid i における建物用地の割合の変化量
 x_{ij} : Grid i における j 番目説明変数の値。各説明変数の定義については後述のとおり

p_i : Grid i における都市化圧の値

β_j : j 番目説明変数に対する重み係数

α_i : Grid i における都市化圧に対する重み係数

ε_i : Grid i における誤差項の値

N : Gridの数

M : 都市化圧以外の説明変数の数

τ : 誤差項の精度(分散の逆数)

Norm : 平均と分散をパラメータにもつ正規分布

なお、都市化圧 p_i については、Grid i の近傍における建物用地率の平均値とGrid i の建物用地率の差分として定義する。ただし、ここでの近傍の定義については以下のとおりとする。すなわち、Grid i の近傍とは、Grid i と他のGridのEuclid距離を算出し、距離が近い順にGridを並べて、自身を除いた上

位4番目のGridまでの距離以下の値を持つGridの集合として定義する。

また、 β_j および α_i 、 τ についてはそれぞれ以下のような事前分布を想定している。

$$\beta_j \sim \text{Unif}(-\infty, +\infty)$$

$$\alpha_i \sim \text{Norm}\left(\frac{1}{a_{i+}} \sum_{k \in D_i, k \neq i} a_{ik} \alpha_k, \frac{1}{\psi a_{i+}}\right)$$

$$\tau \sim \text{Unif}(-\infty, +\infty)$$

図3 数理モデルの概要(その2)

ただし、

$$a_{i+} = \sum_{k \in D_i, k \neq i} a_{ik}$$

$$a_{mn} : 1 \text{ IF } n \in D_m \text{ ELSE } 0$$

D_i : Grid i の「近傍」の領域にあるGridの番号からなる集合

ψ : 周辺の値の拘束力を与えるパラメータ(所与のものとして6種類を与える)

また、 Unif は一様分布、 $\text{Norm}(\cdot)$ は正規分布(平均と分散がパラメータ)

(3) シミュレーションの実施

この一連の確率分布に基づくモデルを構築し、それによりMCMC法(Monte Carlo Markov Chain)によるサンプリングを実施して、各係数の確率分布および代表値を抽出した。MCMCにあたっては、10,000回のシミュレーションを実施して、そのうち5999をBurn-inとして破棄して、4001のサンプリングデータを分析の対象とした。また分析にあたっては、 ψ を所与のものとして5パターン与えて、それぞれのケースにおいてシミュレーションを実施した。そして ψ の各ケースにおいてサンプリングされたパラメータの平均値および標準誤差などを算出し、これに基づいて予測値の誤差によるモデル性能の評価、ならびに得られたパラメータと現状データに基づく将来予測のシミュレーションを実施した。なお、本研究のモデルの性能を評価するにあたっては、比較対象として都市化圧を変数として含まない通常回帰モデル(以下、「通常回帰モデル」、都市化圧を固定効果として変数に含むモデル(以下、「固定効果モデル」)を設定した。

(4) 使用したデータ

使用データの詳細は次のとおりである。まず目的変数である建物用地率の変化については、2006年および2009年の国土数値情報土地利用細分メッシュ(約120m)を、Grid(4次メッシュ)の中で集計し、Grid単位で二時期の差分を得ることにより抽出した。

都市化の説明変数についてはまず表1に示すものを採用して分析をすすめ、単純回帰によるStepwise法(AICに基づく)により変数選択し、最終モデルに採用されるものを絞

表 1 都市化の説明変数

| 名称 | 詳細 |
|----------------------------------|-----------------------------|
| ニュータウン | ニュータウン地区にあるか否か |
| 平均標高 | 平均標高の対数をとったもの |
| 平均傾斜 | 平均傾斜 |
| 市街化区域面積 | - |
| 市街化調整区域面積 | - |
| 農振法による農業地域、農業地区の面積 | - |
| 郵便局数 | - |
| 学校数 | 学校数の対数をとったもの |
| 幼稚園数 | 幼稚園数の対数をとったもの |
| 保育園数 | 保育園数の対数をとったもの |
| バス停数 | バス停数の対数をとったもの |
| 公園数 | 公園数の対数をとったもの |
| 駅数 | 駅数の対数をとったもの |
| 建物用地の割合(土地利用細分メッシュに基づき4次メッシュで集計) | - |
| 農地(水田と畑)の割合(同上) | - |
| 森林の割合(同上) | - |
| 1976年市街地面積 | - |
| 昼間と夜間の人口差 | - |
| 昼間と夜間の学生数の差 | - |
| 昼間と夜間の第二、三次産業従事者数の差 | - |
| 学生数(夜間人口) | 人口1000人あたりの学生、生徒数 |
| 65歳以上人口 | 人口1000人あたりの65歳以上人口数 |
| 第二次、三次従事者の数(夜間人口) | 人口1000人あたりの第二次、三次従事者数(夜間人口) |
| 世帯数 | - |
| 第二次、三次従事者の数(昼間人口) | 人口1000人あたりの第二次、三次従事者数(昼間人口) |
| 全産業事業所数 | - |
| 小売事業所数 | - |
| 飲料食品小売事業所数 | - |
| 飲食店事業所数 | - |
| 病院数 | - |
| 一般診療所数 | - |
| 歯科診療所数 | - |
| 生徒学生数(昼間人口) | 人口1000人あたりの学生、生徒数(昼間人口) |
| 昼間人口(平成17年) | - |
| 夜間人口(平成17年) | - |

りこんだ。なお、数学モデルの構築にあたってはそれぞれのデータの値について、負の値が発生しないように適当な数を加えて対数をとっているものがある。これは試行錯誤により得たものである。変数の具体的な内容および数値処理の詳細についても Table 1 に示すとおりである。また都市化圧については前述の数学モデルにおいて述べたような手続きにより、対象とする Grid 近傍における建物用地率の平均と対象 Grid の建物用地率の差分を算出することにより得た。対象 Grid で周辺 Grid よりも建物用地率が低い場合にはこの値は正を示し、逆の場合には負の値を示すことに留意する。

4. 研究成果

(1) 解析などの結果

まず上記にて得られたシミュレーション結果について、係数 α_i の事前分布の精度を変えたランダム効果モデルの各ケースと、固定効果モデルのそれぞれにおける SSE (誤差の二乗和) をまとめた。すると、 α_i の事前分布の精度を低くすることにより、誤差が大幅に改善されることが判明した。たとえばこの精度を 0.0001 とした場合には SSE で 97.6% の改善がみられた。一方でこの精度を 10000 と設定した場合には、固定効果モデルとの差異がほとんど見られない。この α_i の事前分布は、周辺 Grid の値による α_i の値のコントロールの程度を示すものである。これを小さくする

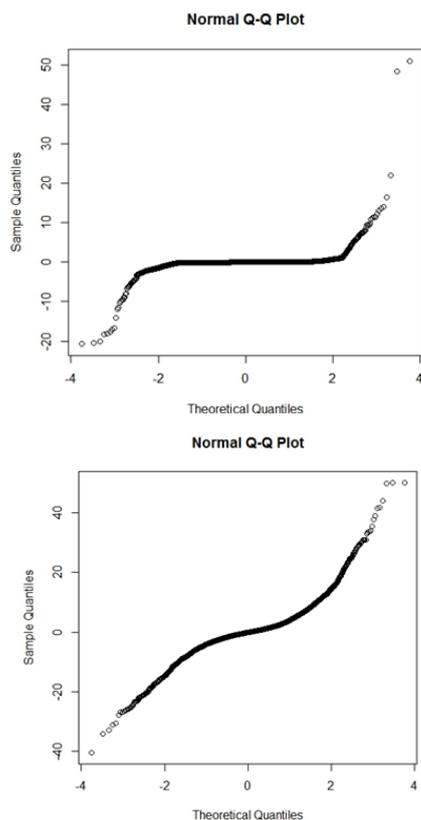


図 4 モデル誤差の QQ プロット

と過学習が発生する。精度が 1 の時にはおよそ 60% の誤差が削減された。

次に、この過学習について、正規分布からの逸脱度により判定する。これが正規分布から大きく逸脱している場合、モデルが妥当でないと考えられ、この場合には過学習が発生していると考えられることができる。 α_i の事前分布の精度が 0.0001 と 1 の場合の QQ プロットを示したものが図 4 である。上のものが精度 0.0001 の場合、下が精度 1 の場合を示している。まず、精度が 0.0001 の場合においては、Quantile が理論値から大きく逸脱し、正規分布よりもさらに中央付近に集中した分布形状であることを読み取ることができ、その点で過学習が発生していることを示している。精度が 1 の時は QQ プロットからみると、誤差項はほぼ正規分布に従っており、先の分析とあわせてみると誤差を抑えつつ、正規分布性を維持し、過学習を防ぐものとして適切なモデル化に成功していることがわかる。

次に精度が 1 の場合における α_i の空間分布を示したものが図 5 である。一見してわかるように、ある程度 α_i に空間的な類似性(近接性)がみられ、周辺の都市化圧の影響に地域特性が存在していることがわかる。すなわち、大阪や京都、神戸などの中心部、それから神戸や大阪のいわゆる郊外ニュータウンにおいては α_i が大きな正の値を示している。その一方で、臨海部や大河川周辺、山に挟まれた開発地域、それから都心と都心の間のいわゆる郊外的な場所、これは阪神間地域においては戦後に開発が進んだ場所である

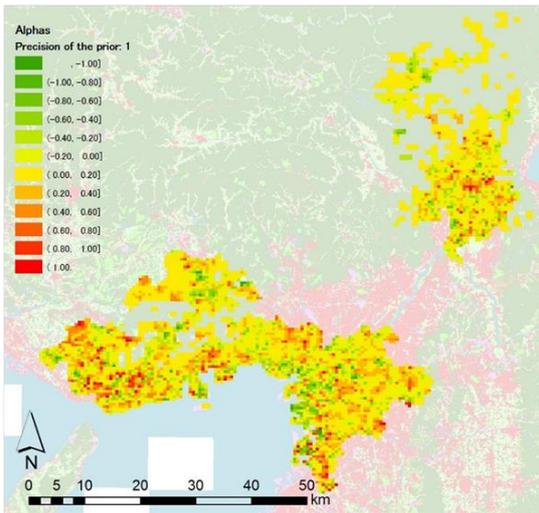


図5 都市化の周辺への影響力を示す係数の空間的分布*

が、これらの場所において α_i が負の値を示している。さらにこの正の値をとる地域と負の値をとる地域の間には緩衝地域的に、この値がゼロに近い値を示す地域が広がる。これは主に都心からわずかに離れた場所にあるエリアである。

この値が高い正の値をとる地域では、周辺の都市化圧が着目している地区の都市化を促していると考えられる。すなわちスプロール的な現象が存在する地域といえる。一方で、負の値をとる地域では周辺の都市化圧の影響がほとんどない、あるいは逆に負の影響を与える可能性がある。このような地域の場合、開発が周辺の人口や商業機能を吸収し、結果的に空地化などを促進すると考えられる。ゼロに近い値をとる地域では、周辺の都市化の影響がまわりにほとんど影響を与えないことを意味している。これらのことから、きわめて限定された都心部においては都市化の基調は依然と続くが、いわゆる郊外的な地区や臨海部ではすでに都市の空地化が進んでいて、きっかけがあればそれが促進される状況にあるといえる。そして、それらの間に位置する近郊部では、都市化は周辺に影響を与えない状況にいたっているといえる。

また、もう一つ特徴的なことは、地区によってはこれらがモザイク状に入り組んで存在していることである。すなわち、都市化圧の影響が正に出るあるいは負にでる、あるいはいずれの影響も与えない地区のそれぞれが空間的に極めて近いエリアにおいて存在しており、それらが複雑に組み合わさって都市が構成されている。このことは都市化の影響の予測を困難にしているともいえるし、さらに人口減少局面に入っている都市においてとくに顕著な現象ともいえる。

(2) 土地利用変化と気温変化のシミュレーション

事前分布の精度が1をとる場合のMCMCの

シミュレーション結果をもとに、それぞれの変数の回帰係数および各地区の α_i の値について、それぞれのサンプリングの平均値からとめ、それらを母数とする土地利用予測シミュレーションを実施し、それを通して土地利用変化の動向について検討した。また、この土地利用変化に対して、別の考察で求めた人工的土地利用面積の気温変化にかかる係数を乗ずることにより、Grid単位での将来的な気温の変化を推定した。

将来予測にあたっては、初期の都市化（建物用地数の増加）の程度、およびそれが発生する地区数を変えながら、それぞれの数値の組み合わせにおいて、各100回のシミュレーションを実施した。結果をみると、全てのGridにおける建物用地率の増加分はシナリオによらず、7.5ポイント程度であることがわかる。最小値は-89.5ポイント程度で、最大値はいずれも同じく95ポイントである。中央値に関しても顕著な差異はみられず、約2.5ポイント程度である。各シナリオにおいては、初期の都市化の程度、また都市化が発生するGrid数は比較的大きく違えてある。それにもかかわらず、得られた結果がシナリオによらず類似していることからみると、広域的な視点で見ると、局所的な都市化の影響は限定的であり、広域のレベルで見た場合には影響が少なく、全体の都市化に対して重要な差異をもたらすには至らないと考えられる。すなわち、ある部分で都市化が発生したとしても別の場所において、その影響を打ち消すだけの建物用地の減少が発生しているのである。これは成熟社会のひとつの特徴といえる。

そこで、地域全体の平均をとるのでなく、各パターンのシミュレーションの結果の一つを取り上げて、局所的な都市化がどのような影響をおよぼし、その地理的な広がりはどうのようなものであるのかという点について詳細に検討する。ここでは初期の都市化率20%かつ都市化発生Grid数200の場合を掲載する(図6)。

まず結果の図をみると、都市化は地理的に連続して発生しており、特に郊外や臨海部においてその傾向が顕著であることがわかる。その一方で数は多くないものの一部の都心部においては、逆都市化（すなわち建物用地の減少）が発生していることがわかる。これらのことから判断すると、局所的な都市化はある期間で連動し、周辺の都市化を惹起し、その点で空間的な広がりを見せるといえるが、その広がりには場所による特性があり、強く都市化が発生する部分とそうでない部分があることがわかる。前者としては臨海部や郊外ニュータウンの辺縁部などがこれに相当し、後者としては都心地区および都心の近郊外がこれに該当するといえる。

次に、この土地利用変化が気温変化に及ぼす影響についてシミュレーションする。先の土地利用変化に関するシミュレーション結

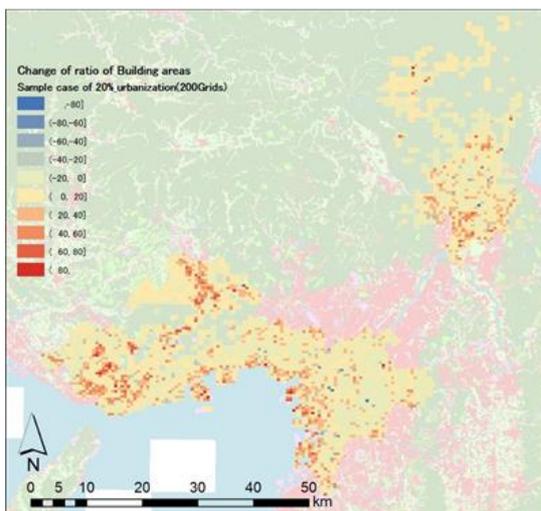


図6 都市化に関するシミュレーションの結果の一例*

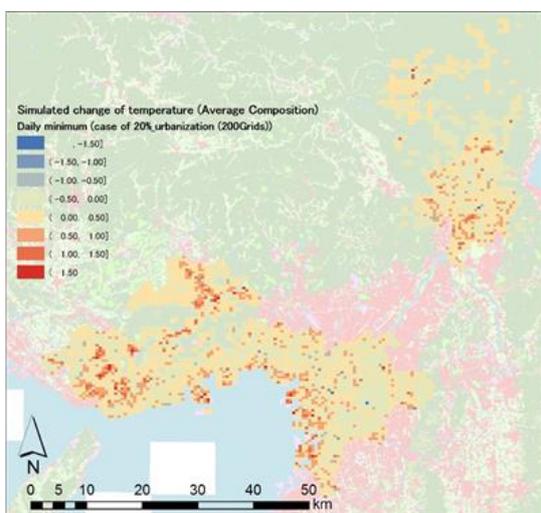


図7 気温変化に関するシミュレーションの結果の一例*

果に、前述の係数を乗ずることにより将来的な気温変化の分布を求める。ここでも先ほどと同様に各シナリオにおける一つの結果をシナリオごとに抽出し、その結果に係数を乗ずることにより推定を進めた。シナリオごとに、夏季の日最低気温の変化、日平均気温の変化、住宅中心の開発が発生した場合における日最低気温の変化のそれぞれについて、全ての Grid の平均をまとめたところ、各シナリオにおいて大きな違いはほとんどみられず、平均的な値として、日最低気温において $0.147\text{--}0.149\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度の上昇、日平均気温について $0.204\text{--}0.207\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度の上昇という結果であった。また、住宅中心の開発を想定したケースにおいては日最低気温で $0.180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度の気温上昇という結果が得られた。

最後に、この気温上昇の分布の一例について、GIS を用いて地図上にしめす。掲載するものは、先の土地利用変化の予測を示した図6に対応するものであり、日最低気温のものを示した。昇温するエリアは空間的に偏っており、とくに臨海部や郊外ニュータウンの辺縁部などで顕著であることがわかる。さらに、

気温変化には空間的な類似性がみられ、ある程度気温変化が連動していることをしめしている。また、都市化が発生した場所とその近傍においては、最大で $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度の昇温が発生する可能性がある。しかしそれは全体にいたることはなく、その影響は局所的なものであると考えられる。

補注：*印をつけた地図の作図において、国土数値情報土地利用細分メッシュデータをもとに作成した背景図を使用した^⑤。

<引用文献>

- ①日本建築学会編著 (2005) やさしくわかる建築・都市計画のためのソフトコンピューティング. 日本建築学会.
- ②青木義次 (2009) 都市変容の確率過程. 大学教育出版.
- ③Clark, J. S. and Gelfand, A. E. (eds.) (2006) Hierarchical modeling for the environmental sciences. New York: Oxford University Press Inc..
- ④久保拓弥 (2012) データ解析のための統計モデリング入門—一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC, 岩波書店.
- ⑤esri ジャパン (2013) ArcGIS データコレクションスタンダードパック 2014

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ①Takashi Kyakuno (2016) Methodology for Evaluating Influences of Anthropogenic Factors on Temperature Formation of Summer Seasons Considering their Randomness—Verification Through the Hierarchical Bayesian Model—. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol 15, No. 3, 643–650.
DOI <http://doi.org/10.3130/jaabe.15.643>
(査読あり)

[学会発表] (計1件)

- ①Takashi Kyakuno (2018) Prediction of land use changes with Bayesian Spatial Modeling for the perspective of urban climate. 10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society.
(Abstract 審査あり)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

客野 尚志 (KYAKUNO, Takashi)
関西学院大学・総合政策学部・教授
研究者番号：80322725