夏季の高気温が外出量に及ぼす影響の統計分析

Statistical Analysis of the Impact of Summer High Temperatures on the Amount of Outings

仲野 ゆい*
Yui NAKANO
*地域計画学・レジリエンス計画研究室（指導教員：奥村誠 教授）

地球温暖化による気温上昇が深刻化する中，夏季の高気温が日々の外出量に影響を与えている可能性がある．本研究では 2023 年 7,8 月の首都圏を対象に高気温が外出量に与える影響を分析する．その際，非線形な気温の効果を固定効果とし，影響を与え得る他の要因を変量効果として導入した線形混合モデルを用いて，気温が及ぼす影響のみを取り出す．その結果，高気温の領域で市区町村内外の外出量は減少している傾向が確認でき，各時刻の平均気温を 1.5~3.5℃程度上回ると外出量が抑制され始めることがわかった．

Key Words： *summer high temperature, outing, linear mixed model*

1.　はじめに

近年，地球温暖化による気温上昇が深刻化しており，高気温が日々の外出量に影響を与えている可能性がある．本研究では，記録的な猛暑となった 2023 年の夏を対象に，高気温が外出量に与えた影響を統計的に明らかにすることを目的とする．具体的には，非線形な気温の効果を固定効果とし，影響を与え得る他の要因を変量効果として導入した線形混合モデルを用いて，気温が外出量に及ぼす影響のみを取り出す．

2.　外出量と気温の算定方法

(1) モバイル空間統計

本研究ではドコモが提供する「モバイル空間統計」を用いて，外出量を表す指標を作成する．モバイル空間統計では，500m メッシュの 1 時間ごとの居住地市区町村別推計人口を把握できる．本研究では，比較的人口密度が高く，公共交通機関が充実しており，気温上昇が顕著である地域として首都圏を選択し，高気温により外出量が影響を受けている可能性が高い 2023 年 7,8 月の 12~18 時の 7 つの時間帯を対象とする．

(2) 市区町村内の外出量の算出方法

モバイル空間統計から市区町村内の移動を直接捉えることは不可能である．そこで，本研究では居住地市区町村に滞在している人を対象に，式(1)を用いて移動距離の最小値を算出する．これを，市区町村内外出量$Y_{d,t,c}$と呼び，1 人当たりの外出量の指標として用いる．

$$Y_{d,t,c} \equiv min \sum_i \sum_j X_{d,t,c,ij} C_{c,ij} \tag{1}$$

$$s.t. \quad X_{d,t,c,ij} \geq 0 \qquad \forall_{i,j} \in I_c$$

$$\sum_j X_{d,t,c,ij} = \frac{O_{c,i}}{\sum_i O_{c,i}} \qquad \forall_i \in I_c$$

$$\sum_i X_{d,t,c,ij} = \frac{D_{d,c,t,j}}{\sum_j D_{d,c,t,j}} \qquad \forall_j \in I_c$$

$X_{d,t,c,ij}$：市区町村c日付dに，深夜 2 時の滞在メッシュiから時刻tにメッシュjに移動した人数の市区町村cの中での割合

$C_{c,ij}$：市区町村c内のメッシュij間の距離

$O_{c,i}$：市区町村cのメッシュiにおける深夜 2 時滞在人口を 62 日間で平均した人数

$D_{d,t,c,j}$：市区町村c日付d時刻tにおけるメッシュiの滞在人口

I_c：市区町村内cのメッシュの集合

(3) 市区町村間の外出量の算出方法

居住地市区町村rごとの各市区町村の滞在人口をモバイル空間統計から直接求める．これを，市区町村間外出量$Z_{d,t,c,r}$と呼ぶ．

(4) 気温データ

気象庁が公開する過去の気象データを利用し，首都圏内 34 ヶ所の気象観測所から得られる時別値の気温(以下，時刻別気温)と日別値の最高気温(以下，日最高気温)を用いる．各市区町村の 14 時における人口重心に最も近い気象観測所を対応させ，日付d滞在地市区町村c時刻tの時刻別気温$Q_{d,t,c}$と日最高気温$P_{d,c}$の値を求める．

3.　夏季の高気温が市区町村内外出量に及ぼす影響

時刻別気温，日最高気温の固定効果は，非線形である可能性を考慮してそれぞれ式(2)，式(3)のように 3 次式で定式化する．

$$f_{d,t,c}^{hour} = \alpha_t^{hour0} + \alpha_t^{hour1} Q_{d,t,c} + \alpha_t^{hour2} Q_{d,t,c}^2 + \alpha_t^{hour3} Q_{d,t,c}^3 \tag{2}$$

$$f_{d,t,c}^{max} = \alpha_t^{max0} + \alpha_t^{max1} P_{d,c} + \alpha_t^{max2} P_{d,c}^2 + \alpha_t^{max3} P_{d,c}^3 \tag{3}$$

変量効果として，$\beta_{t,c}^{city}$，$\beta_{d,t}^{weeks}$，$\beta_{d,t}^{wkdy}$，$\beta_{d,t,c}^{ctwd}$の 4 つを設定する．$\beta_{t,c}^{city}$は地域の特徴による外出量の違いを除

去するための滞在地市区町村ごとの水準である．$\beta_{d,t}^{weeks}$は普段とは異なる外出行動を取る時期の影響を除去するための週ごとの水準である．$\beta_{d,t}^{wkdy}$は通勤・通学などの義務的な外出行動を考慮するための平休日それぞれの水準である．$\beta_{d,t,c}^{ctwd}$は平休日の水準の違いが市区町村ごとに異なることを加味するための滞在地市区町村と平休日の交互作用ごとの水準である．

ここで，最高気温の観測値を多く含む 12~15 時については，時刻別気温と日最高気温の影響を分離することが難しいと考え，時刻別気温の固定効果$f_{d,t,c}^{hour}$のみを考える．

以上を踏まえ，時刻tの市区町村内外出量の対数値を説明する線形混合モデルとして，12~15 時には式(4)に示すモデルを，16~18 時には式(5)に示すモデルを考えて，最尤法により推定を行う．$\varepsilon_{d,t,c}$は正規分布に従う誤差項である．

$$\log Y_{d,t,c} = \alpha_t + f_{d,t,c}^{hour} + \beta_{t,c}^{city} + \beta_{d,t}^{weeks} + \beta_{d,t}^{wkdy} + \beta_{d,t,c}^{ctwd} + \varepsilon_{d,t,c} \quad (4)$$

$$\log Y_{d,t,c} = \alpha_t + f_{d,t,c}^{hour} + f_{d,t,c}^{max} + \beta_{t,c}^{city} + \beta_{d,t}^{weeks} + \beta_{d,t}^{wkdy} + \beta_{d,t,c}^{ctwd} + \varepsilon_{d,t,c} \quad (5)$$

推定結果から求まる式(2)，式(3)の値の指数を取ると，気温に依る外出量の変化率が求められる．気温を横軸にとり，変化率とデータ数の分布を示すヒストグラムを図 1 に示す．時刻別気温の影響(青色)は，どの時間帯においても高気温の領域で大きく外出量を減少させている．以上より，各時刻で気温の上昇が一定以上になると外出量が抑制されるという傾向は，どの時間帯でも確認された．一方で，16~18 時において最高気温の影響(赤色)は，高気温の領域でほぼ一定であり，昼間の最高気温が高く，抑制された外出が後の時間帯に移されるという効果は確認できなかった．

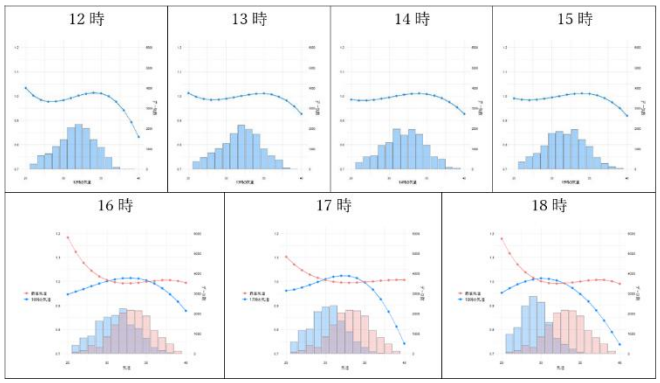

図 1　気温の市区町村内外出量への影響

4.　夏季の高気温が市区町村間外出量に及ぼす影響

市区町村間外出量の分析は移動距離別に行う．移動距離は，0~5 時における各市区町村居住者の夜間人口重心と，時刻tにおける目的地市区町村の来訪者の人口重心との距離を与えた．データ数を考慮し，0~5km, 5~10km, 10~20km, 20~30km, 30~40km, 40km~の 6 段階の距離帯ごとに推定を行う．この際，3 と同様のモデルの変量効果に，居住地市区町村の特徴による外出量の違いを除去するための居住地市区町村ごとの水準$\beta_{r,t}^{residence}$を加えた．気温の効果として，すべての時間帯で居住地市区町村の時刻別気温$Q_{d,t,c}$の固定効果$f_{d,t,r}^{hour}$のみを導入し，式(6)に定式化した．

$$\log Z_{d,t,c,r} = \alpha_t + f_{d,t,r}^{hour} + \beta_{t,c}^{city} + \beta_{t,r}^{residence} + \beta_{d,t}^{weeks} + \beta_{d,t}^{wkdy} + \beta_{d,t,c}^{ctwd} + \varepsilon_{d,t,c,r} \quad (6)$$

3 と同様の手順で，気温の市区町村間外出量への影響を確認すると，6 距離帯 7 時間帯の 42 通りのうち，気温の固定効果の推定値が有意であったのは，30 通りであった．これらのすべてについて，高気温の領域で外出量が減少傾向に転じていることがわかった．

5.　外出量が抑制され始める気温

気温が外出量に与える影響が増加から減少に転じる気温を時刻ごとに式(2)から算出し，市区町村内・距離帯別に図 2 に示す．ここで，p 値と有意水準の大小によりプロットの記号を分け，下部に各時刻の平均気温を示した．市区町村内，市区町村間の外出量はどちらも図中に示した平均気温と似た傾向を示しており，平均気温から 1.5~3.5℃程度高い気温になると，外出量を抑制する効果がはたらき始めることがわかった．

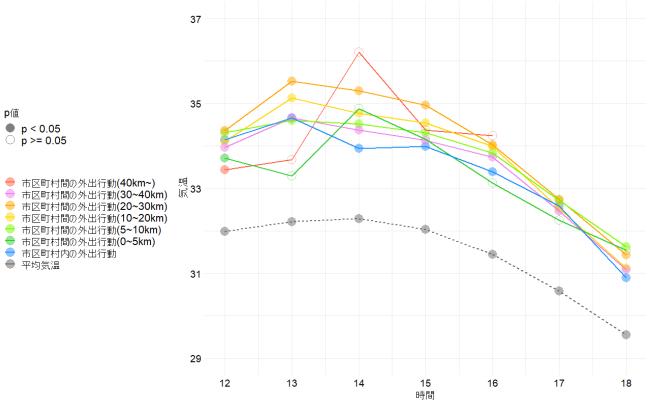

図 2　外出量が減少傾向に転じる気温

6.　おわりに

本研究では，夏季の高気温が外出量に及ぼしている影響を分析した．その結果，高気温の領域で市区町村内外の外出量は減少しているという傾向が確認でき，各時刻の気温が平均気温から 1.5~3.5℃程度高くなると外出量を抑制させ始めることがわかった．今後の課題として，他の気象条件や移動手段の影響を考慮することが考えられる．

参考文献

1) Armstrong, B, G., et al.：Association of mortality with high temperatures in a temperate climate: England and Wales, J Epidemiol Community Health, Vol.65, pp.3405-3409, 2010

(2024 年 2 月 6 日提出)