プールモデルを活用した
将来メッシュ人口の推計手法
—100mメッシュ単位を対象として—

吉田　護[1]・中野一慶[2]・多々納裕一[3]

[1]正会員　長崎大学准教授　総合生産科学域環境科学系（〒852-8521 長崎市文教町1-14）
E-mail:yoshida-m@nagasaki-u.ac.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　電力中央研究所　社会経済研究所（〒100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1）
E-mail: k-nakano@criepi.denken.or.jp

[3]正会員　京都大学　防災研究所（〒611-001 京都府宇治市五ヶ庄）
E-mail: tatano.hirokazu.7s@kyoto-u.ac.jp

本研究では，将来メッシュ人口の推計枠組みを提案，実際に2010年を基準として2100年までの将来メッシュ人口の推計を行う．具体的な推計手法について，メッシュ人口の自然増減（出生・死亡）についてはメッシュ単位のコーホート要因法により推計し，社会増減（転出・転入）については市町村人口をプールモデルを用いて推計した上で，その出力である各市町村への転出・転入人口を各メッシュに按分して推計する．2015年度の推計値と実測値の比較の結果，他のモデルより予測誤差が小さいことが確認された．また，メッシュ人口の推計結果を用いて，岡山県を対象とした洪水浸水想定区域内の人口及び潜在的な犠牲者数を推計した結果，犠牲者数の観点からは2070年頃まで増加傾向にあることが示される．

Key Words : *population projection, pool model, 100m-mesh, long-term projection*

1. はじめに

人口減少や少子高齢化など日本全体の人口動態が抱える課題に対して，社会基盤整備や災害リスク評価などを適切に行うためには，その空間的な人口分布を考慮する必要がある．こうした問題意識から，本研究ではプールモデルを活用したメッシュ単位の将来人口の推計手法を提案，実際に2010年の100mメッシュ単位人口データから2100年のメッシュ人口を推計する．

人口推計にあたっては，コーホート（同年または同期間に出生した人口集団）を単位として，出生，死亡，転出，転入過程に何等かの仮定を置いて人口推計するコーホート要因法が用いられることが多い．国全体や都道府県，市町村，メッシュ単位など，どの空間基本単位の人口推計を行うか，また集計，公開されている人口動態を決定づける一次データの種類によって採用すべき推計手法は異なる．メッシュ人口の推計にあたっては，都道府県や市町村人口とは異なり，人口動態を決定づけるデータが集計ないし公開されていない．そのような条件下において，実効性を確保しつつより精度の高い人口推計手法を開発することは重要な研究課題である．本研究では，2015年のメッシュ人口の実績値と2010年のメッシュ人口から推計した2015年のメッシュ人口の推計値を比較することを通じて，その予測精度の改善を示しながら，日本全体の2100年のメッシュ別の将来人口の推計を試みる．また，実際に推計した100mメッシュ単位の将来人口を用いて，岡山県を対象として洪水浸水想定区域内の人口及び潜在的な犠牲者数の推移を推計する．治水計画において，気候変動による長期的な影響を考慮した治水計画への転換が求められる[1)]一方で，将来の人口分布など長期的な社会構造の変化は考慮しきれていない．洪水浸水総手区域内の潜在的な犠牲者数の時間的推移を明らかにすることを通じて，災害リスク評価及び治水計画への展開の可能性についても言及する．

2. 本研究の基本的枠組み

(1) 100mメッシュ単位の将来人口推計

将来の人口推計について，国立社会保障・人口問題研

究所（以下，社人研）は，国，都道府県，市町村単位の将来人口推計を定期的に実施している[2),3)]．国については基準年から50年先まで，出生3仮定，死亡3仮定の組み合わせによる9本の基本推計と，100年先までの長期参考推計を実施，公開している．また，県及び市町村については基準年から30年先までの人口推計を実施，公開している．国土交通省国土政策局もまた，社人研が公開しているデータを用いて2015年の国勢調査人口を基準として，2050年までの全国の500m及び1kmメッシュ別将来人口を試算，公開している[4),5)]．気候変動の影響評価の枠組みにおいては，共有世界共通パス（shared Socioeconomic pathways, SSPs）が開発されており[6),7)]，5つの将来シナリオのもと，シナリオに沿った2100年までの国単位の将来人口推計が行われている[8)]．また，国立環境研究所は，日本版SSPとして，社人研の推計で用いられた出生率や死亡率を用いて，2100年までの市町村別，1kmメッシュ別，0.05度メッシュ別の人口推計結果を公開している[9)]．市町村単位，メッシュ単位の人口推計に用いられている推計方法やデータの諸元に違いは見られるが，これらは公的な機関が推計した将来人口として利用できる．ただし，治水経済評価マニュアル[10)]では，家屋資産の評価額の算出に際して100mメッシュデータによる建物の延べ床面積を用いることから，これら公的機関による人口推計結果は実際の災害リスク評価や治水計画を検討する上では解像度の低いデータであると捉えられる．こうした背景から，本研究では， 100mメッシュ単位，また気候変動でしばしば議論される2100年をターゲットとして人口推計を行う枠組みを提案，その実効性，有効性を示す．

(2) 従来の人口推計手法との相違点

本研究では，コーホート要因法の枠組みを援用したメッシュ人口の推計手法を提案する．なお，他の人口推計手法については，時系列モデルやマイクロシミュレーションを用いた推計手法も提案されているが，データの利用可能性や予測精度の観点から，コーホート要因法は多くの国で社会実践されている．上記の公的機関による人口推計もすべてコーホート要因法に類する人口推計手法を採用していることから，本研究においてもコーホート要因法を応用したメッシュ人口の推計手法を提案する．

その上で，コーホート要因法と単にいっても，厳密には想定する仮定によって幾つかの種類がある．人口変動は，自然増減（出生と死亡）と社会増減（転出と転入）に分離できるが，特に社会増減については，幾つかのモデルが提案，予測精度も含めてその実行可能性が検証されている．その中で，Rogersは，ロジャーズモデル[11)]，プールモデル[12)]，二地域間モデル[12),13)]を提案しており，純移動率を用いた人口推計の課題を指摘している[14)]．具体的には「純移動数の創造」[14-16)]と言われる課題であり，（国内の）転出者の総数と転入者の総数が一致しない，という不整合が発生する．また，人口推計結果も人口増加局面においては過少評価，人口減少局面においては過大評価になる傾向も指摘されている．純移動率モデルを用いた人口推計は，他の市区町村（メッシュ）の推計結果に拠らずに推計できることから，汎用性は高く計算負荷は小さいという利点がある．事実，国土交通省によるメッシュ人口推計や国立環境所による日本版SSPメッシュ人口推計は純移動率を用いて人口推計を実施されている．本研究におけるメッシュ人口の推計においても，自然変動（出生と死亡）については従来の手法と同じく，各コーホートに生残率や出生率を乗じることによって推計するため，その点は既存の枠組みと同一である．その上で，社会変動については，プールモデルを用いて市区町村単位の人口推計を実施，その出力である市区町村毎の転出人口，転入人口の推計値を各市区町村内のメッシュに配分することによってメッシュ単位の社会変動を推計する．ロジャースモデルや二地域間モデルでも国内の総転出人口と総点入人口は一致するが，メッシュ単位の社会変動推計において，ロジャースモデルの出力である発着地別の転出，転入人口までは不要であり，県単位ではあるもののプールモデルの予測精度の高さが確認されていること[17)]，社人研が実施している県・市町村の人口推計においてもプールモデルが援用されていることから[3)]，市区町村の将来人口推計においてはプールモデルを用いて人口推計する．

(3) 本研究の目的

本研究では，将来メッシュ人口の推計枠組みを提案，実際に2010年を基準として2100年までの将来メッシュ人口の推計する．その上で，その利用法として，岡山県を対象として洪水浸水想定区域（想定最大規模）の人口推移を推計する．また，平成30年7月豪雨で洪水被害にあった岡山県倉敷市真備町の人的被害データを用いて潜在的な犠牲者関数を推定，岡山県全域に適用し，岡山県全体の潜在的な犠牲者数の推移を推計する．

河川整備（堤防等の整備）が計画規模の降雨に対して設計，実施されるのに対して，洪水浸水想定区域（想定最大規模）は，現在の計画規模の降雨に沿った河川整備を終えても，洪水による被害が発生しうる区域として捉えられる．今後人口減少が進むのは確実視されているが，人口減少過程に沿いつつ，自然災害に対して頑健な都市計画整備も求められている．洪水浸水想定区域の人口及潜在的な犠牲者数の推移過程は重要な基礎資料となり得る．こうした観点から，洪水浸水想定区域の人口及び潜在的な犠牲者数を推計する．

3. メッシュ人口推計式の定式化

(1) メッシュ人口の推計方法の枠組み

人口動態の基本式は

$$P^{t+1} = P^t + B^{t,t+1} - D^{t,t+1} + I^{t,t+1} - O^{t,t+1}$$

のように表される．なお，P^tは時点tの人口，$B^{t,t+1}$は時点tから$t+1$の間の出生者数，$D^{t,t+1}$は時点tから$t+1$の間の死亡者数，$I^{t,t+1}$は時点tから$t+1$の間の転入者数，$O^{t,t+1}$は時点tから$t+1$の間の転出者数を表す．人口変動は自然変動と社会変動，すなわち，出生，死亡と転出，転入に分離され，この基本式は，市町村単位，メッシュ単位などどの空間基礎単位においても成立する[18]．その上で，将来人口の推計手法は，直接的な観測データの有無や推計精度，かけられる労力や費用によって選択されるべきとされる[19]．

メッシュ人口の推計にあたって，本研究では，ゼンリン社による 2010 年及び 2015 年の 100m 単位の男女別，5 歳区分別の推計メッシュ人口を基準人口として利用する．これらのデータは，公開されている 2010 年及び 2015 年の4次メッシュ（500mメッシュ）単位に集計された統計データをゼンリン住宅地図に含まれる住宅系建物の戸数を 100m メッシュ単位で集計し，集計値の比にしたがって配分した推計値である．総務省が公開するメッシュ人口は 250m メッシュが最小のメッシュ区分であり，100m メッシュ単位の人口は公開されていないが，この配分方法は一つの有効な 100m メッシュ単位の人口の推計方法と考えられ，また2010年及び2015年の男女別，5歳区分別の総人口と整合的なため，本研究ではこのデータを基準人口として利用する．

はじめに，基準人口データが 5 歳区分別の人口データであるため，5 年毎の人口推計と相性が良い．そのため，本研究においても 2010 年を基準年として，5 年毎の将来人口を推計する．

時点t，年齢$x \sim x+4$, 性別$g\left(\in \{m: \text{男性}, f: \text{女性}\}\right)$の市区町村$c$のメッシュ$m_c\left(\in M_c = \{\text{市町村}c\text{に属するメッシュ}\}\right)$の人口を$p^t_{m_c,g,x}$と表す．このとき，

$$p^{t+5}_{m_c,g,x+5} = \left(0.5 \times io^{t,t+4}_{m_c,g,x} + p^t_{m_c,g,x}\right)s^t_{m_c,g,x} + 0.5 \times io^{t,t+4}_{m_c,g,x+5}$$

$$p^{t+5}_{m_c,g,100^+} = \left(0.5 \times io^{t,t+4}_{m_c,g,95} + p^t_{m_c,g,95}\right)s^t_{m_c,g,95} + 0.5 \times io^{t,t+4}_{m_c,g,100^+} + \left(0.5 \times io^{t,t+4}_{m_c,g,100^+} + p^t_{m_c,g,100^+}\right)s^t_{m_c,g,100^+}$$

$$p^{t+5}_{m_c,g,0} = 0.5 \times \left(io^{t,t+4}_{m_c,g,b} + b^{t,t+4}_{m_c,g}\right)s^t_{m_c,g,b} + 0.5 \times \left(io^{t,t+4}_{m_c,g,b} + b^{t,t+4}_{m_c,g}\right)$$

が成立することを仮定する．なお，$s^t_{m_c,g,x}$はメッシュm_c，性別g，年齢$x \sim x+4$の生残率，$io^{t,t+4}_{m_c,g,x}$は期間$t \sim t+4$のメッシュm_c，性別g, 年齢$x \sim x+4$の純転入 j 人口を表す． また，期間$t \sim t+4$の出生人口を$b^{t,t+4}_{m_c,g}$，出生人口の生残率を$s^t_{c,g,b}$，出生者の純転入人口を$io^{t,t+4}_{m_c g,b}$と表す．

(2) メッシュ人口の自然増減の仮定

生残率について，本研究では，全国同一であることを仮定する．具体的には，

$$s^{t,t+4}_{m_c,g,x} = s^{t,t+4}_{g,x}, \qquad {}^\forall m_c$$

を仮定する（$x = b, 0, 5, 10, \cdots, 100^+$）．

都道府県間や市区町村間の生残率の差異を指摘する論文はあるが，2100年までの人口推計を行うにあたって，一貫して利用可能な諸元は多くない．本研究では，Wittgenstein Centre が公開している 5 つの共有社会経済パスに対応した生残率を用いた[20]．

同様に，出生率についても，本研究では同一であることを仮定する．具体的には，

$$b^{t,t+4}_{m_c} = \sum_{x \in \{15,20,\cdots,45\}} 0.5 \times \left(p^t_{m_c,f,x} + p^{t+5}_{m_c,f,x}\right) \times br^{t,t+4}_x$$

$$b^{t,t+4}_{m_c,m} = \frac{SRB}{1+SRB} b^{t,t+4}_{m_c}$$

$$b^{t,t+4}_{m_c,f} = \frac{100}{100+SRB} b^{t,t+4}_{m_c}$$

を仮定し，年齢$x \sim x+4$の女性の出生率$br^{t,t+4}_x$は地域によらないことを仮定する．出生性比 SRB（sex ratio at birth）は 105 を仮定する．出生率についても同様に，Wittgenstein Centre が公開している値を用いて人口推計を行う[20]．生残率と同様に，出生率についても地域間に差異があるが，2100年といった長期の人口推計に利用可能なデータソースは少ない．生残率，死亡率ともに地域間の差異の考慮は今後の課題である点は先に申し添えておきたい．

(3) プールモデルを用いた市区町村単位の転出・転入人口の推計

メッシュ単位の転出，転入人口の統計データは一切公開されていないため，一定の仮定に基づいて推計する必要がある．本研究では，純転入人口$io^{t,t+4}_{m_c,g,x}$を国内への転出人口$do^{t,t+4}_{m_c,g,x}$，国内からの転入人口$di^{t,t+4}_{m_c,g,x}$，国外からの純転入人口$fio^{t,t+4}_{m_c,g,x}$に分離してそれぞれ推計を行

う．具体的には，

$$io_{m_c,g,x}^{t,t+4} = di_{m_c,g,x}^{t,t+4} - do_{m_c,g,x}^{t,t+4} + fio_{m_c,g,x}^{t,t+4}$$

が成立することを仮定する．

その上で，メッシュm_cへの国内からの転入人口$di_{m_c,g,x}^{t,t+4}$，国内への転出人口$do_{m_c,g,x}^{t,t+4}$は，プールモデルを用いて推計する市区町村単位の将来人口推計を行う際の出力である市区町村単位の転入人口，転出人口の推計値をメッシュに配分することによって推計する．はじめに，市区町村の人口動態の基本式を

$$P_{c,g,x+5}^{t+5} = \left(0.5 \times IO_{c,g,x}^{t,t+4} + P_{c,g,x}^{t}\right)s_{g,x}^{t} + 0.5 \times IO_{c,g,x+5}^{t,t+4}$$

$$P_{c,g,100^+}^{t+5} = \left(0.5 \times IO_{c,g,95}^{t,t+4} + P_{c,g,95}^{t}\right)s_{g,95}^{t} + 0.5 \times IO_{c,g,100^+}^{t,t+4} + \left(0.5 \times IO_{c,g,100^+}^{t,t+4} + P_{c,g,100^+}^{t}\right)s_{g,100^+}^{t}$$

$$P_{c,g,0}^{t+5} = 0.5 \times \left(IO_{c,g,b}^{t,t+4} + B_{c,g}^{t,t+4}\right)s_{g,b}^{t} + 0.5 \times \left(IO_{c,g,b}^{t,t+4} + B_{c,g}^{t,t+4}\right)$$

を仮定する．なお，

$B_c^{t,t+4}$=$\sum_{x\in\{15,20,\cdots,45\}} 0.5 \times \left(P_{c,f,x}^{t} + P_{c,f,x}^{t+5}\right) \times br_x^{t,t+4}$

$$B_{c,m}^{t,t+4} = \frac{SRB}{100 + SRB} B_c^{t,t+4}$$

$$B_{c,f}^{t,t+4} = \frac{100}{100 + SRB} B_c^{t,t+4}$$

と表す．メッシュと同様に，市区町村間の生残率，出生率で差異はないことを仮定し，Wittgenstein Centre による公開値を利用する．その上で，

$$IO_{c,g,x}^{t,t+4} = DI_{c,g,x}^{t,t+4} - DO_{c,g,x}^{t,t+4} + FIO_{c,g,x}^{t,t+4}$$

が成立することを仮定する．

ここで，市区町村の人口推計においてはプールモデルを適用する．具体的には，

$$DO_{c,g,x}^{t,t+4} = P_{c,g,x}^{t} e_{c,g,x}^{t}$$

$$Pool_{g,x}^{t} = \sum_{c\in C} P_{c,g,x}^{t} e_{c,g,x}^{t}$$

$$DI_{c,g,x}^{t,t+4} = Pool_{g,x}^{t} d_{c,g,x}^{t}$$

が成立することを仮定する．なお，

$$e_{c,g,x}^{t} = \frac{\sum_{c'\in C\setminus\{c\}} E_{c,c',g,x}^{t,t+4}}{P_{c,g,x}^{t}}$$

$$d_{c,g,x}^{t} = \frac{\sum_{c'\in C\setminus\{c\}} E_{c',c,g,x}^{t,t+4}}{\sum_{c\in C}\sum_{c'\in C\setminus\{c\}} E_{c,c',g,x}^{t,t+4}}$$

より算出する．なお，$E_{c,c',g,x}^{t,t+4}$は期間$t \sim t+4$，性別g，年齢$x \sim x+4$の市区町村cから市区町村c'を転居者数を表す．本研究では，2015 年国勢調査の「5 年前じょうじ」データから 2010 年から 2015 年の間の市区町村cから市区町村c'への転居者数を集計（「5 年前の常住市区町村『不詳』」と「移動状況『不詳』」は按分），各転出率，配分率を算出し，2100 年までの各 5 年期間一定であることを仮定して人口推計を実施した．

最後に，国外からの市区町村 c への純転入人口$FIO_{c,g,x}^{t,t+4}$については，

$$FIO_{c,g,x}^{t,t+4} = \frac{P_{c,g,x}^{t}}{\sum_{c\in C} P_{c,g,x}^{t}} \times FIO_{g,x}^{t,t+4}$$

として各市区町村の人口比で按分している．以上により，市区町村単位の 2100 年までの将来人口推計が実施でき，各 5 年期間の市区町村 c への転入人口$DI_{c,g,x}^{t,t+4}$，転出人口$DO_{c,g,x}^{t,t+4}$，国外からの純転入人口$FIO_{c,g,x}^{t,t+4}$もあわせて推計される．なお，先に指摘した通り，コーホート要因法では純移動率モデルを用いる場合も多い．純移動率の算出方法は幾つかあるが，本研究では

$$ne_{c,g,x}^{t} = \frac{\sum_{c'\in C\setminus\{c\}} E_{c',c,g,x}^{t,t+4} - \sum_{c'\in C\setminus\{c\}} E_{c,c',g,x}^{t,t+4}}{P_{c,g,x}^{t}}$$

$$DI_{c,g,x}^{t,t+4} - DO_{c,g,x}^{t,t+4} = P_{c,g,x}^{t} \times ne_{c,g,x}^{t}$$

により純移動率を算出し，同様に市区町村単位の将来人口推計を実施，先の「純移動数の創造」が長期の人口推計においては特に本質的課題となり得ることを示す．なお，純移動率を用いた人口推計値は，国単位の将来人口の推計値とは一致しないため，国単位の人口推計値で補正が行われる．推計精度については，補正を行う場合も含めて，提案するモデルと比較する．

(4) メッシュ人口の社会増減の仮定

メッシュm_cへの転入人口$i_{m_c,g,x}^{t,t+4}$，転出人口$o_{m_c,g,x}^{t,t+4}$について，

$$di_{c,g,x}^{t,t+4} = \frac{P_{c,g,x}^{t}}{\sum_{c\in C} P_{c,g,x}^{t}} \times DI_{c,g,x}^{t,t+4}$$

$$do_{c,g,x}^{t,t+4} = \frac{P_{c,g,x}^{t}}{\sum_{c\in C} P_{c,g,x}^{t}} \times DO_{c,g,x}^{t,t+4}$$

を仮定する．すなわち，市区町村毎の転出人口，転入人口を人口比で按分してメッシュ毎の国内への転出人口，国内からの転入人口を推計する．以上により，国及び市区町村単位の人口推計と整合的なメッシュ単位の将来人口推計が可能となる．また，各メッシュへの海外からの純転入人口$fio_{m_c,g,x}^{t,t+4}$は

$$fio_{m_c,g,x}^{t,t+4} =\times FIO_{c,g,x}^{t,t+4}$$

を仮定する．

なお，本研究では，メッシュ単位においても出生，死亡，転出，転入を分離して将来人口推計を行ったが，メッシュ単位の男女別，年齢区分別人口のデータがないとき，メッシュ単位の出生，死亡人口の推計にコーホート要因法を用いることは出来ない．このとき，人口推計の代替的な方法として，市区町村単位の人口増減を配分する手法が考えられる（以下，人口増減按分モデル）．具体的には，

$$PP_{c,g,x}^{t,t+5} = P_{c,g,x}^{t+5} - P_{c,g,x}^{t}$$

$$p_{m_c,g,x+5}^{t+5} = \frac{P_{m_c,g,x}^{t}}{\sum_{m_c \in M_c} P_{m_c,g,x}^{t}} \times PP_{c,g,x}^{t,t+5} + p_{m_c,g,x}^{t}$$

により人口推計される．これは市区町村単位の人口推計結果を利用して，時点tと時点$t+5$の人口推計値の差を各メッシュに割り当てている．メッシュ人口が総人口のデータしかないときはこちらの手法も有効と考えられる．ただし，この手法によって推計されるメッシュ人口は，市区町村cが$t \sim t+4$の間で人口増加しているとき，市区町村c内のすべてのメッシュで人口増加し，逆に市区町村cが人口減少しているとき，属するすべてのメッシュの人口が減少する，という受け入れがたい特徴はある．メッシュ単位の人口推計においては，この人口増減モデルと社会増減モデルの予測誤差を比較する．

4. メッシュ単位の将来人口推計とその利用

(1) プールモデルによる市区町村の将来人口推計

はじめにプールモデルによる市区町村単位の将来人口の推計結果を，国単位のモデルの推計結果もあわせて**図-1**に示す．想定通りではあるが，国単位モデルの推計結果と市区町村単位の推計値の総計は一致する．その上で 2015 年の市区町村単位人口の実測値との誤差については，$RMSE$（Root Mean Squared Error），$MALPE$（Mean Algebraic Percent Error），$MAPE$（Mean Absolute Percent Error）の観点から評価する．それぞれ

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\#C}\sum_{c \in C}\left(\sum_g \sum_x \hat{P}_{c,g,x}^{2015} - \sum_g \sum_x \tilde{P}_{c,g,x}^{2015}\right)^2}$$

$$ALPE_c = \left(\frac{\sum_g \sum_x \hat{P}_{c,g,x}^{2015}}{\sum_c \sum_g \sum_x \hat{P}_{c,g,x}^{2015}} - \frac{\sum_g \sum_x \tilde{P}_{c,g,x}^{2015}}{\sum_c \sum_g \sum_x \tilde{P}_{c,g,x}^{2015}}\right) / \frac{\sum_g \sum_x \tilde{P}_{c,g,x}^{2015}}{\sum_c \sum_g \sum_x \tilde{P}_{c,g,x}^{2015}} \times 100$$

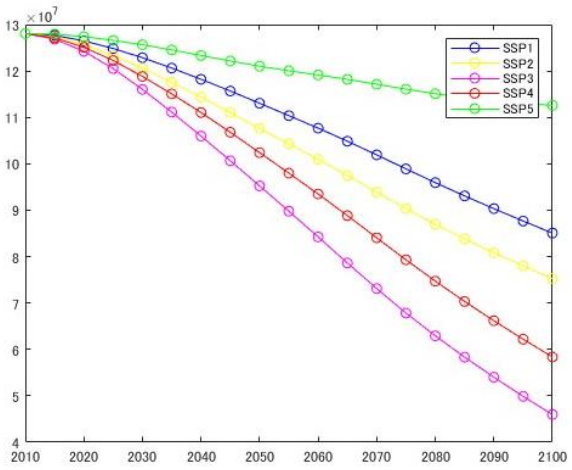


図-1 プールモデルによる市町村別人口の集計値の推移

$$APE_c = \left|\frac{\sum_g \sum_x \hat{P}_{c,g,x}^{2015}}{\sum_c \sum_g \sum_x \hat{P}_{c,g,x}^{2015}} - \frac{\sum_g \sum_x \tilde{P}_{c,g,x}^{2015}}{\sum_c \sum_g \sum_x \tilde{P}_{c,g,x}^{2015}}\right| / \frac{\sum_g \sum_x \tilde{P}_{c,g,x}^{2015}}{\sum_c \sum_g \sum_x \tilde{P}_{c,g,x}^{2015}} \times 100$$

$$MALPE = \frac{\sum_{c \in C} ALPE_c}{\#C}$$

$$MAPE = \frac{\sum_{c \in C} APE_c}{\#C}$$

で定義される．なお，$\hat{P}_{c,g,x}^{2015}$は 2015 年度の市区町村c，年齢$x \sim x+4$歳，性別gの推計値であり，$\tilde{P}_{c,g,x}^{2015}$は実測値を表す．$ALPE$やAPEは，人口統計学分野で開発された予測精度の指標であり，市区町村人口の推計値の精度というよりは，総人口に占める各市区町村人口の比率に着目した指標となっている [21),22)]．$ALPE_c$が正のとき，当該市町村の推計値は実測値より過剰に推計されており，負のときは実測値より過少に推計されたものと判断される．また，APE_cは常に小さいほうが予測誤差は小さい．

表-1 に予測誤差の評価をまとめたものを示す．なお，SSPs の詳細な説明は他紙に譲る [6)]．また，プールモデルにおける SSPs 毎の転出率，配分率の仮定は筆者らの過去の論文を参照されたい [23)]．その上で，過去の傾向を踏襲する SSP2 に対応した出生率，死亡率，（国外からの）純転入者数を用いた推計結果が RMSE 及び MAPE の観点から誤差が小さいことが分かる．なお，国単位で将来人口推計も実施しているが，想定通りその推計値はプールモデルによる市町村別の人口推計値の集計値と一致している．また，**図-2** に SSP に応じた国内の総点入出者数の推移を表す．プールモデルでは（国内からの）総転出人口と（国内への）総転入人口は一致する．その上で，時間経過と共に総転出（転入）人口は減少していく傾向が読み取れる．

表-1 プールモデルによる市町村別人口の推計結果の予測誤差

プールモデル	RMSE ($\times 10^3$)	MALPE ($\times 10^{-3}$)	MAPE ($\times 10^{-2}$)
SSP1	4.22	-10.28	2.41
SSP2	1.88	6.48	1.46
SSP3	2.00	8.40	1.60
SSP4	3.31	-0.18	1.82
SSP5	5.54	-7.34	2.61

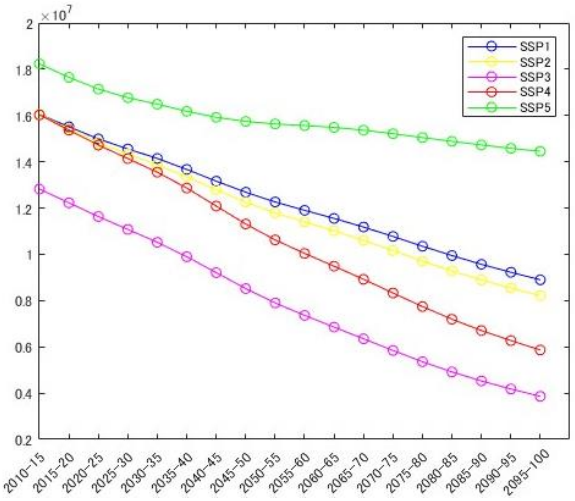


図-2 プールモデルによる市町村別転出・転入人口の集計値の推移

(2) 長期推計における「純移動数の創造」

続いて，**図-3** に SSP2 のプールモデル及び純移動率を用いた将来の総人口の推計結果を示す．また，その予測誤差をまとめたものを**表-2** に示す．純移動率を用いた人口推計には，「純移動率の創造」の問題が発生するが，長期の人口推計ほど全国の人口推計の集計値と乖離することが分かる．2040 年時点では 0.98%に過ぎなかったが，2070 年時点で 6.11%，2100 年時点で 18.79%の過大推計となっている．また，国単位モデル等，上位の推計結果と整合性を図るため，総推計人口が一致するように補正を行う場合がしばしばあるが，**表-2** に示すように，総人口の推計値は一致するものの予測誤差はさほど変化は見られない．以上より，長期の人口推計においては純移動率を用いた人口推計は避けるべきであることが分かる．

以上の分析結果を踏まえて，メッシュ人口の推計に際しては，SSP2 の出生率，死亡率，純転入人口を用いる．プールモデルによって推計された各市町村の転出人口，転入人口をメッシュに配分することによって，メッシュ人口を推計する．

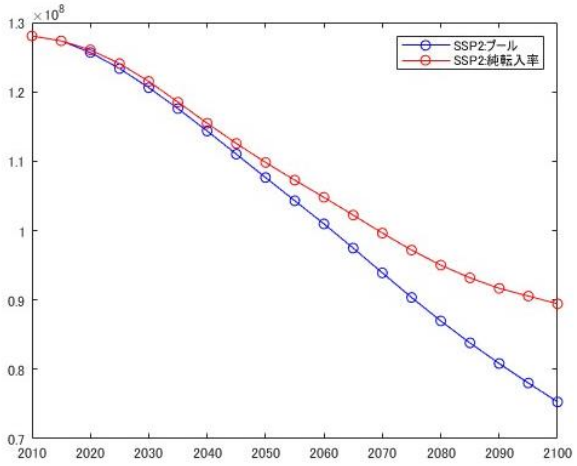


図-3 プールモデル及び純移動率モデルの推計誤差

表-2 プールモデルと純移動率モデルの予測誤差

SSP2	MRMSE ($\times 10^3$)	MALPE ($\times 10^{-3}$)	MAPE ($\times 10^{-2}$)
プールモデル	1.88	6.48	1.46
純移動率(補正無)	5.85	2.86	5.54
純移動率(補正有)	5.85	2.87	5.54

(3) 100m メッシュ単位の将来人口推計

メッシュ単位の人口推計においては，出生人口，死亡人口はコーホート要因法によって，（国内への）転出人口，（国内からの）転入人口は，先のプールモデルの出力をメッシュに人口比で按分することによって推計する（以下，社会増減按分モデル）．なお，メッシュ単位の男女別，年齢区分別人口のデータが利用できない場合，上記の推計方法は適用できない．そのため，代替的な方法として，市町村単位の人口推計結果を用いて，各時点間の市区町村の増減人口を各メッシュ人口で単純に按分する方法（以下，人口増減按分モデル）と比較することによってその予測誤差を確認する．メッシュ単位の予測誤差については，市区町村単位の人口推計の予測誤差と同様に，$MRMSE$，$MALPE$，$MAPE$ の観点から評価する．具体的な指標については，

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{\#M}\sum_{m\in M}\left(\sum_g\sum_x \hat{P}^{2015}_{m,g,x} - \sum_g\sum_x \tilde{P}^{2015}_{m,g,x}\right)^2}$$

$$ALPE_m = \left(\frac{\sum_g\sum_x \hat{P}^{2015}_{m,g,x}}{\sum_m\sum_g\sum_x \hat{P}^{2015}_{m,g,x}} - \frac{\sum_g\sum_x \tilde{P}^{2015}_{m,g,x}}{\sum_c\sum_g\sum_x \tilde{P}^{2015}_{m,g,x}}\right) \Big/ \frac{\sum_g\sum_x \tilde{P}^{2015}_{m,g,x}}{\sum_m\sum_g\sum_x \tilde{P}^{2015}_{m,g,x}} \times 100$$

$$APE_m = \left| \frac{\sum_g \sum_x \hat{P}^{2015}_{m,g,x}}{\sum_m \sum_g \sum_x \hat{P}^{2015}_{m,g,x}} - \frac{\sum_g \sum_x \tilde{P}^{2015}_{m,g,x}}{\sum_m \sum_g \sum_x \tilde{P}^{2015}_{m,g,x}} \right| / \frac{\sum_g \sum_x \tilde{P}^{2015}_{c,g,x}}{\sum_c \sum_g \sum_x \tilde{P}^{2015}_{c,g,x}} \times 100$$

$$MALPE = \frac{\sum_{m \in M} ALPE_m}{\#M}$$

$$MAPE = \frac{\sum_{m \in M} APE_m}{\#M}$$

のように定義される．なお，Mは全国のメッシュのインデックスの集合であり．$\#M$はそのメッシュ数を表す．

図-4 に SSP2 の出生率，生残率，純転入人口を用いた，100m メッシュ単位の人口の推計値の集計値の推移を示す．これは，先のプールモデルの推計結果，国単位モデルの推計結果，さらに人口増減按分モデルの推計結果とも整合的である．その上で，**表-3** に社会増減按分モデルと自然増減按分モデルの予測誤差をまとめたものを示す．結果として，$RMSE$に大きな差異はなかったが，APEについては社会増減モデルの優位性が示された．なお，平均化する前のAPEを確認すると，人口増減按分モデルの推計結果と大きな差はなかったり，逆に人口増減按分モデルによる推計結果のほうが実測値との誤差が小さいメッシュも多かった．この按分手法については，種々の属性を考慮して按分化を図るなど改善の余地があり，今後の課題である点は先に申し添えたい．

(3) 岡山県を事例とした洪水浸水想定区域の潜在的犠牲者数の推計

上記の推計結果を活用して，岡山県を事例として洪水浸水想定区域（想定最大規模）（**図-5**）の将来人口及び潜在的な犠牲者数を推計した．

洪水浸水想定区域内の人口の推計方法について，浸水深区分別の洪水浸水想定区域（想定最大規模）と重なっている場合に当該メッシュは洪水浸水想定区域のメッシュと判定，複数の浸水深区分と重なる場合は最も浸水深の大きい区分のメッシュとして判定し，2100 年までの岡山県内の想定浸水深人口を推計した．結果をまとめたものを**図-6** に示す．2010 年時点において，1,944,922 人，岡山県内の 62.7%の人口が洪水浸水想定区域に居住していた．洪水浸水想定区域人口については，2040 年時点では大きな変化はないが，2070 年で 1,424,907 人，2100 年で 1,156,044 人といった減少傾向が読み取れる．一方で，総人口に占める洪水浸水想定区域内人口については，2040 年で 67.4%と増加する一方で，2070 年，2100 年ではそれぞれ 69.33%，69.52%と大きな変化は見られない．この結果は，当面は洪水浸水想定区域の人口が出生や転入に

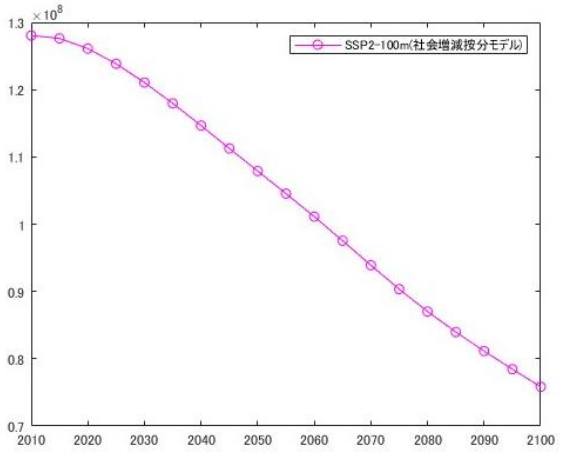


図-4 100m メッシュ単位人口推計の集計値の推移

表-3 100m メッシュ単位の人口推計の予測誤差

SSP2	RMSE	MALPE ($\times 10^{-2}$)	MAPE ($\times 10^{-1}$)
社会増減按分	19.55	5.39	3.14
人口増減按分	19.53	6.57	3.23

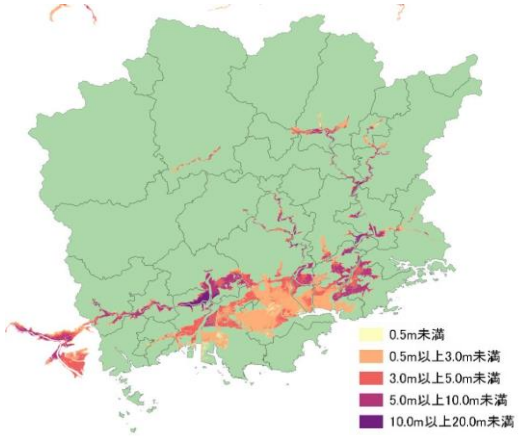


図-5 岡山県の洪水浸水想定区域（国土数値情報の洪水浸水想定区域データ[24]より筆者作成）

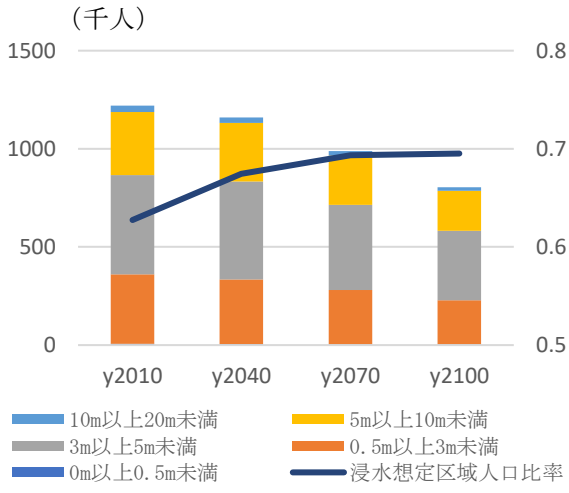


図-6 浸水深区分別の洪水浸水想定区域の人口推移

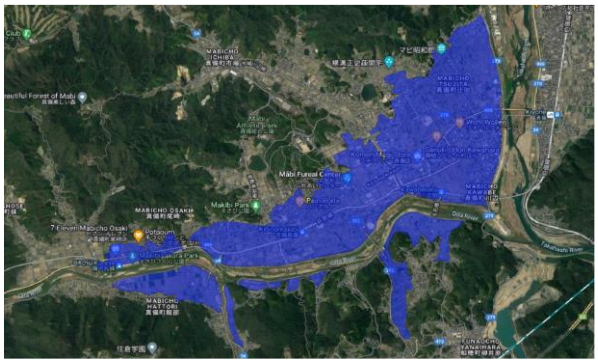


図-7　平成 30 年 7 月豪雨の真備町付近の浸水推定図（国土地理院浸水推定範囲データ [25] から筆者作成）

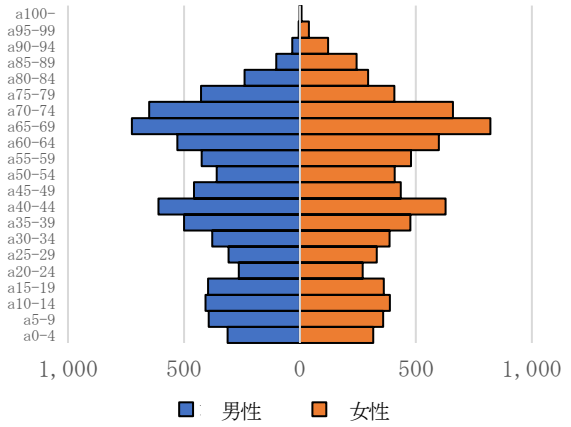


図-8　浸水推定区域の人口ピラミッド（推計値）

よって維持され，堤防等や避難体制の整備は引き続き重要な課題となるが，長期的には岡山県全域で人口減少が進むため，洪水浸水想定を切に考慮した都市構造，居住誘導が必要となることを示している．

続いて，潜在的な犠牲者の推計を行う．潜在的な犠牲者数の推計方法について，本研究では平成30年7月豪雨の際の真備町の洪水事例を用いて推計した．具体的には，国土地理院が公開する浸水推定範囲（国土地理院技術資料D1-No.940，**図-7**）から，浸水推定区域内の性別，年齢区分別の人口を推計した（**図-8**）．その上で，平成平成30年7月豪雨時の洪水区域で犠牲になった方の人口分布（**図-9**）を用いて年齢別の潜在的犠牲率を算出（**図-10**），2100年までの潜在的な犠牲者数の推移を推計した．なお，浸水推定区域内の総人口は15,591人であり，本洪水による犠牲者数は51人だった．年齢区分を10歳区分毎に再編し，その比率から犠牲者関数を推計した．その上で，この犠牲者関数を岡山県全域に適応し，将来の潜在的な犠牲者数の推移をまとめたものを**図-11**に示す．結果として，洪水による潜在的な犠牲者数は，2070年前後までは増加傾向を示した一方で，2100年では2040年より

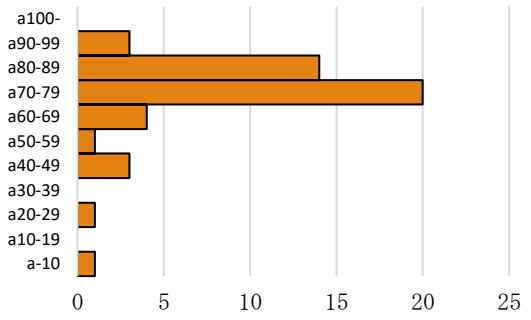


図-9　犠牲者の年齢分布（N=51）

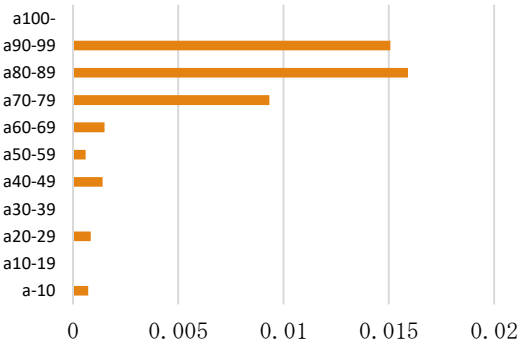


図-10　年齢別の潜在的犠牲率

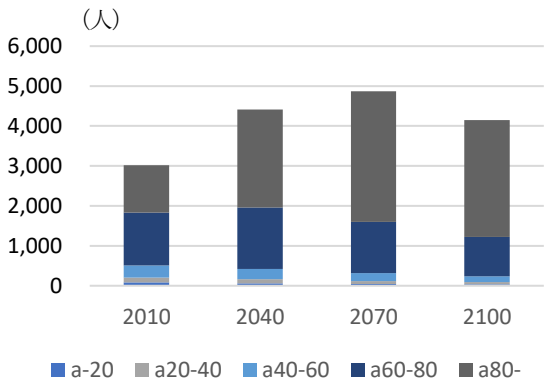


図-11　潜在的洪水犠牲者数の推移（推計値）

低下しうることが明らかとなった．

犠牲者関数が示す通り，高齢者の犠牲率は，他の年代と比較して明らかに高い．2100年では人口減少による影響によって潜在的な洪水犠牲者数そのものが減少局面に入っているが，高齢化の影響による潜在的な犠牲者数は増加局面にあると考えられる．現時点においては，洪水による人的被害軽減の観点からは，高齢者を対象にした対策・対応がより一層重視されるべき局面といえる．また，人的被害の軽減効果について，現在の治水経済評価の枠組みでは人命被害の評価が含まれていない[10]．犠牲

者数は洪水の発生時刻等の自然的要因や避難勧告等の社会的要因に左右されるため，その推計は困難であることが理由とされているが，社会構造の変化を踏まえた治水経済評価へ展開するためには，潜在的な犠牲者の推計とその減少効果を定量化していくことが望まれる． 今後のさらなる研究蓄積が必要である．

5. おわりに

本研究ではプールモデルを用いて市区町村の将来人口推計を実施，その出力である市区町村毎の転入人口，転出人口の推計値を用いて，100m メッシュ単位の将来人口推計を行った．加えて，岡山県の洪水浸水想定区域（最大想定規模）の将来人口及び潜在的な犠牲者数の推計を実施，その推移過程の特徴を明らかにした．

なお，本人口推計手法にはその精度を向上させるために幾つかの課題がある．一つ目は，本研究では市区町村単位の転入人口，転出人口を推計し，それをメッシュ単位の人口比で按分することによってメッシュ単位の転入人口，転出人口を推計した．ただし，その按分に際しては，当該メッシュの人口以外にも，周辺人口の影響も含めた人口ポテンシャルや地形的要因，都市計画的要因など，種々の変数を用いて関数化すると，推計値の予測精度は改善される可能性がある．また，本研究では，転出率や配分率の算出する際に，2015 年の国勢調査データを利用したが，この移動人口は 2010 年から 2015 年の移動傾向を反映したものであり，2100 年までこの移動傾向が継続するとは限らない．2005 年や 2010 年の国勢調査も用いて転出率，配分率を平準化して算出したり，転出率，配分率そのものをモデル化し，将来の人口推計に活用することで予測精度の改善が期待できる．これらは今後の課題としたい．

REFERENCES

1) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会: 気行動変動を踏まえた治水計画のあり方：提言，令和元年 10 月，令和 3 年 4 月改訂，https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/chisui_kentoukai/index.html（2023 年 10 月 13 日アクセス可）
2) 国立社会保障・人口問題研究所: 日本の将来推計人口（令和 5 年推計），https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2023/pp_zenkoku2023.asp（2023 年 10 月 13 日アクセス可）
3) 国立社会保障・人口問題研究所: 日本の地域別将来推計人口（平成 30（2018）年推計），https://www.ipss.go.jp/pp-zenkoku/j/zenkoku2023/pp_zenkoku2023.asp（2023 年 10 月 13 日アクセス可）
4) 国土交通省国土政策局：平成 27 年国勢調査を基準とした 500m 及び 1km メッシュ別将来人口の試算方法について，https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/mesh500_1000_h30.pdf（2023 年 10 月 8 日アクセス可）
5) 国土交通省国土政策局：メッシュ別将来人口推計を活用した分析の展開－地域における生活関連サービスの利用可能性の分析－，平成 28 年 6 月．https://www.mlit.go.jp/common/001144843.pdf（2023 年 5 月 19 日アクセス可）
6) O'Neill, B. C., et al.: The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century, Global Environmental Change, Vol. 42, pp. 169-180, 2017.
7) Jiang, L. and O'Neill, B. C.: Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways, Global Environmental Change, Vol. 42, pp. 193-199, 2017.
8) KC, S. and Lutz, W.: The human core of the shared socioeconomic pathways: population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100, Global Environmental Change, Vol. 42, pp. 181-192, 2017.
9) 気候変動適応情報プラットフォーム（A-PLAT）: 社会経済シナリオに応じた市区町村別人口推計，https://adaptation-platform.nies.go.jp/socioeconomic/population.html（2023 年 10 月 23 日アクセス可）
10) 国土交通省水管理・国土保全局：治水経済調査マニュアル（案），令和 2 年 4 月．https://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/r204/chisui.pdf（2023 年 10 月 8 日アクセス可）
11) Rogers, A.: Matrix methods of population analysis, *Journal of American Institute of Planners*, 321, pp.40-44, 1966.
12) Rogers, A.: Shrinking large scale population projection models by aggregation and decomposition, *Environment and Planning* A, 8, pp.515-541, 1976.
13) Isserman, A.M.: The right people, the right rates: Making population estimates ad forecasts with an interregional cohort-component model, Journal of the American Planning Association, 59, pp.45-64, 1993.
14) Rogers, A. Requiem for the net migrant, *Geographical Analysis*, 22(4), pp.283-300, 1990.
15) 稲葉寿: 多次元人口成長モデルにおけるパラメータ推定問題について，人口問題研究，187, pp.29-45, 1988.
16) 小池司朗: 地域別将来人口推計における純移動率モデルの改良について，人口問題研究，64(1), pp. 21-38, 2008.
17) 小池司朗: 地域別将来人口推計における人口移動モ

デルの比較研究，人口問題研究，64(3)，pp.87-111, 2008.
18) Preston, S.H.: Demography: Measuring and Modeling Population Processes, WB, 2000.
19) Smith, S.K.., Tayman, J., Swanson, D.A.: A practitioner's guide to state and local population projections, Springer, 2013.
20) Wittgenstein Centre for Demography and Global Human Capital: Wittgenstein Centre data explorer, http://dataexplorer.wittgensteincentre.org/shiny/wic/ (2023 年 10 月 13 日アクセス可)
21) Smith, S.K.: Tests of forecast accuracy and bias for country population projections, Journal of American Statistical Association, 82(400), p.991-1003, 1987
22) Smith, S.K., Sincich, T.: Stability over time the distribution of population growth of states, 1950-1980, *Journal of Regional Science*, 25, pp461-474, 1988
23) 中野一慶，吉田護，多々納裕一：Shared Socioeconomic Pathways の社会経済シナリオを考慮した市町村人口の推計，土木学会論文集 D3（土木計画学），75(6), I_219-I_229, 2020.
24) 国土数値情報ダウンロードサービス: 洪水浸水想定区域データ（河川単位），https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A31a-v4_0.html（2023 年 10 月 13 日アクセス可）
25) 国土地理院: 平成 30 年 7 月豪雨に関する情報，6. 推定浸水範囲，https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30.taihuu7gou.html（2023 年 10 月 23 日アクセス可）

MESH-POPULATION PROJECTION METHOD USING POOL MODEL —FOR 100m-MESH-UNIT PROJECTION —

Mamoru YOSHIDA, Kazuyoshi, NAKANO and Hirokazu TATANO

This paper proposes a projection framework for future mesh-based population, and actually projects the 100m-mesh population in 2100 on the basis of 2010. In the detailed framework, the natural dynamics, including birth and death, of population of each mesh is estimated by use of the cohort component method and the social dynamics, including domestic in-migrant and out-migrant, is estimated by use of a pool model for municipality-based population projection. As a result, being compared the estimated populations with the actual populations, the proposed framework shows a superiority in some estimation-error indicators. In addition, this paper estimates the future population in assumed inundation areas and potential human losses in Okayama prefecture. The result shows an incremental tendency of potential human losses until around 2070.