

# 大地震時における迅速な人的被害推計手法の改良

沖 拓弥・大佛 俊泰

## Improvement of Quick Estimation Method of Human Casualty in the Event of a Large Earthquake

Takuya OKI and Toshihiro OSARAGI

**Abstract :** Techniques for quickly and easily estimating wide-area damage are required to support initial activities for reducing damage in the event of a major earthquake. In the previous paper, we analyzed the relationship among local urban characteristics, property damage and human casualties based on a large number of simulation results. In this paper, we improve the quick estimation method of human casualties using a multiple regression model or a machine learning method, and construct the models, which can estimate the number of casualties and people with difficulties in evacuation in 250 m grid units.

**Keywords :** 大地震 (large earthquake) , 人的被害 (human casualty) , 市街地性状 (local urban characteristic) , 重回帰分析 (multiple regression analysis) , 機械学習 (machine learning) , 初動活動支援 (initial activity support)

### 1. はじめに

大地震時における被害低減のための初動活動を支援する上で、広域被害を迅速かつ簡易に推計する技術が求められている。

前稿で筆者らは、シミュレーションによる多数の被害推計結果を原データとして、地域の市街地性状と物的被害・人的被害との関連を分析した(沖ほか, 2018 ; Oki et al., 2019) . 本稿では、回帰モデルや機械学習手法を比較検討しながら、前稿の人的被害推計手法を改良し、市街地性状などから要因別の死亡者数・避難困難者数を 250m メッシュ (5 次メッシュ) 単位で推計可能なモデルを構築する。

### 2. 人的被害推計の流れ

#### 2.1 シミュレーションによる被害推計データ作成

筆者ら(坂本ほか, 2018)が開発した簡便な広域避難シミュレータ(図-1)を活用して、あらかじめ大地震時の物的・人的被害推計データを多数

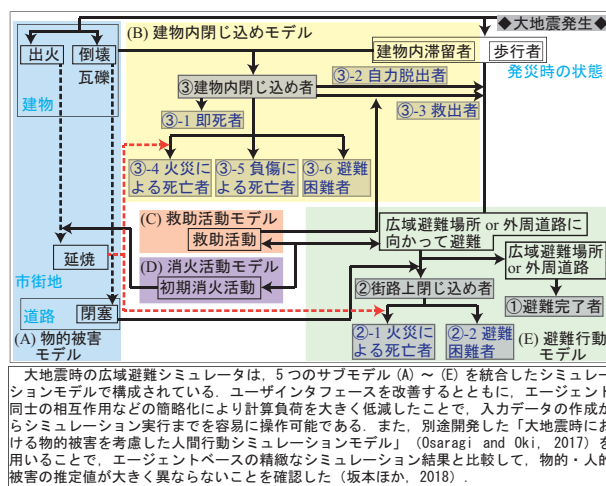


図-1 シミュレーションモデル(坂本ほか, 2018)

作成した。本シミュレータを用いることで、発災から 24 時間後の状態に基づき、滞留者を被害に応じて分類できる(表-1)。本稿では、死亡者(②-1, ③-1, ③-4 および③-5)と避難困難者(表-1の②-2 および③-6)を合わせて「人的被害」と呼ぶ。

東京都(2016)が指定する「整備地域<sup>1)</sup>」を参考に設定した 32 地区(図-2)を対象に、各地区について 7 通りの地表面最大速度(PGV : 50 cm/s から 110 cm/s まで 10 cm/s 刻み)と 100 ケースの物

表-1 滞留者の分類 (坂本ほか, 2018)

|   |
|---|
| ①避難完了者：地区内の広域避難場所または外周道路までの経路が得られた者                               |
| ②街路上閉じ込め者   |
| ②-1 火災による死亡者 (街路上)：延焼範囲内の者 (※本稿では、発災時の滞留建物/道路ノードが延焼範囲内である者としている。) |
| ②-2 避難困難者 (街路上)：延焼範囲外の者   |
| ③建物内閉じ込め者   |
| ③-1 即死者 (圧死)・瀕死者  |
| ③-2 自力脱出者   |
| ③-3 救出者：「①避難完了者」が避難中に閉じ込め建物の前面道路を通過する者                            |
| ③-4 火災による死亡者 (建物内)：延焼範囲内の者 (※本稿では、発災時の滞留建物が延焼範囲内である者としている。)       |
| ③-5 負傷による死亡者 (建物内)：延焼範囲外の重傷者                                      |
| ③-6 避難困難者 (建物内)：延焼範囲外のその他の者                                       |

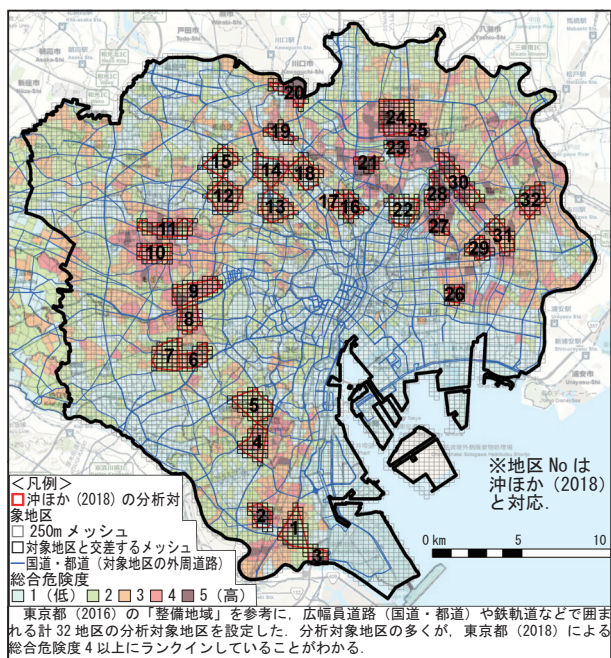


図-2 分析対象地区の分布

的被害の組み合わせの下で、計 22,400 (= 32 × 7 × 100) 回のシミュレーションを実行した<sup>2)</sup>。

## 2.2 市街地変数および物的・人的被害推計結果

各地区の市街地性状を表す変数 (市街地変数) および各回 (計 22,400 回) のシミュレーション結果を、250m メッシュ単位で集計する。東京都 23 区と重なる 250m メッシュ (全 10,144 メッシュ) のうち、分析対象地区 32 地区と重なるものは約 11.0% (1,113 メッシュ) である。

市街地変数の一覧を図-3(a)に、250m メッシュ単位で集計した各市街地変数のヒストグラムを図-3(b)に示してある。変数の種類によって、頻度分布の形状が大きく異なっている。同様に、物的被害割合 5 種類 (全壊建物割合、閉塞道路割合、出火建物割合、焼損建物割合、初期消火成功建物割合) および表-1 の分類別滞留者割合について

- (1) 滞留者数 [人]：発災時 (冬の夕刻 18 時) におけるメッシュ内の滞留人数。平成 20 年東京都市街地バーントリップ調査データを用いて推定した建物内滞留者数と屋外歩行者数の合計値を用いている (その他の移動者は考慮しない)。
- (2) 建物数 [棟]：メッシュ内に重心点が存在する建物棟数。東京都都市計画 GIS データの平成 28 年建物現況調査データに基づく。
- (3) 道路ノード数 [個]・(4) 道路リンク数 [本]：メッシュ内の道路ノード数、および、メッシュ内に中点が存在する道路リンク数。東京消防庁提供のデータ (平成 26 年) に基づく。
- (5) 不燃化率 [%]：[(メッシュ内耐火建物総面積)+(メッシュ内準耐火建物総面積) × 0.8]/(メッシュ内建物総面積) × 100。
- (6) 旧耐震建物割合 [%]・(7) 旧耐震木造建物割合 [%]：メッシュ内の全建物数に占める、1981 年以前に建てられた建物数・木造建物数の割合。
- (8) クロス建築率 [%]：メッシュ内の建物の建築面積の合計を、道路等の公共用地を含めたメッシュ全体の面積で除した値。
- (9) 平均沿道建物数 [棟]・(10) 平均階数 [階]・(11) 平均建築面積 [m<sup>2</sup>]・(12) 平均延床面積 [m<sup>2</sup>]・(13) 平均道路幅員 [m]・(14) 平均道路長さ [m]：いずれもメッシュ内の建物・道路の平均値。
- (15) 狭幅員道路割合 [%]・(16) 広幅員道路割合 [%]：メッシュ内の道路リンク総延長に占める、それぞれ幅員 4m 未満・幅員 8m 以上の道路延長の割合。
- (17) ノードリンク比 [本/個]：(交差点に接続する道路リンク本数の総和)/(メッシュ内の交差点総数)。
- (18) 建物倒壊危険度・(19) 火災危険度・(20) 総合危険度：いずれも「地震に関する地域危険度測定調査 (第 8 回)」(東京都, 2018) で公表されている町丁目単位の値を各建物に与え、それをもとに算出したメッシュ内の建物の平均値。
- (21) メッシュ～避難完了地点間距離 [m]：メッシュ境界から最近隣の避難完了地点までの直線距離 (メッシュ内部に避難完了地点が存在する場合には 0 とする)。
- (22) メッシュ重心点～避難完了地点間距離 [m]：メッシュ重心点から最近隣の避難完了地点までの直線距離。
- (23) 地区内メッシュ面積 [m<sup>2</sup>]：対象地区内に含まれる部分の面積。
- (24) 地区内メッシュ割合 [%]：対象地区内に含まれる部分の面積が、メッシュ全体の面積に占める割合 (メッシュが対象地区内に完全に含まれる場合には 1 とする)。

(a) 市街地変数の一覧

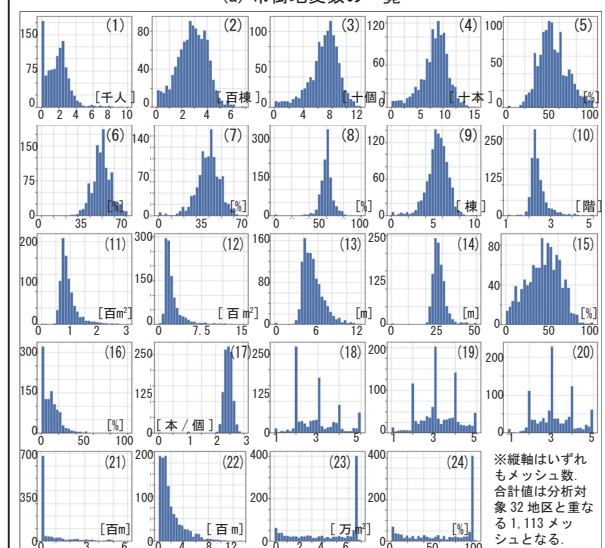


図-3 市街地変数の定義と集計値の分布

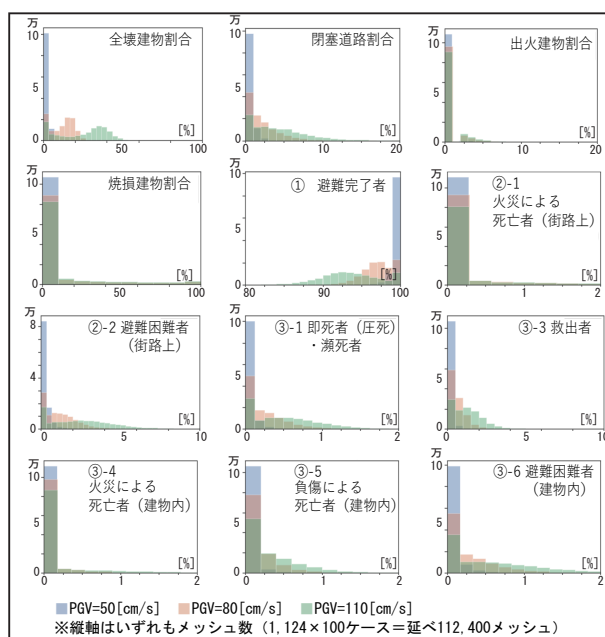


図-4 物的被害割合と分類別滞留者割合の集計値の分布

も、それぞれ 250m メッシュ単位で集計し、代表的な PGV の値ごとに分布を示す (図-4)。

### 2.3 要因別の死亡者数・避難困難者数推計モデル

250m メッシュ単位の物的被害については、Hirokawa and Osaragi (2016) による一連の物的被害推計モデルを用いることで、東京都全域という広範囲であっても、震源の位置から被害分布を短時間で推計できる。一方、人的被害については、これまで広域での迅速な推計が困難であった。そこで本稿では、物的被害割合 (上述の 5 種類) を所与とし、PGV と市街地変数 (図-3 で定義した 24 個) も含めた合計 30 個の説明変数を用いて、目的変数である 250m メッシュ単位の要因別死亡者数・避難困難者数を記述するモデルを構築する。

モデル式は、線形重回帰モデルと、教師あり機械学習を用いた回帰モデルの一種であり、非線形関係も記述可能な Random Forest 回帰モデル (図-5) について検討する。

## 3. 人的被害推計モデルの推定と検証

### 3.1 人的被害推計モデルの推定方法

対象地区 32 地区と重なる全 1,113 メッシュのうち 11 メッシュは、複数地区に重複して含まれる。すなわち、説明変数 (基準化済み) と目的変数の組み合わせは、1,124 メッシュ × PGV7 通り × 物的被害 100 ケース = 786,800 サンプル存在する。このサンプルの 80% (629,440 サンプル) を学習データ、残りの 20% をテストデータとして、2.3 節で述べた 30 個の説明変数から要因別の人的被害を記述するモデルを推定する<sup>3)</sup>。

### 3.2 人的被害推計モデルの精度

前稿 (沖ほか, 2018) における検討で、市街地性状や物的被害割合から直接、死亡者数や避難困難者数を精度良く推定することは困難であると判明している。そこで本稿では、(1) 最初に避難完了者数のみを推定し、死亡者・避難困難者の合計人数を把握した上で、(2) 説明変数に避難完了者数を含んだモデルによって、人的被害の内訳を推定する方法を採用した。

線形重回帰モデルの回帰係数の推定値を表-2

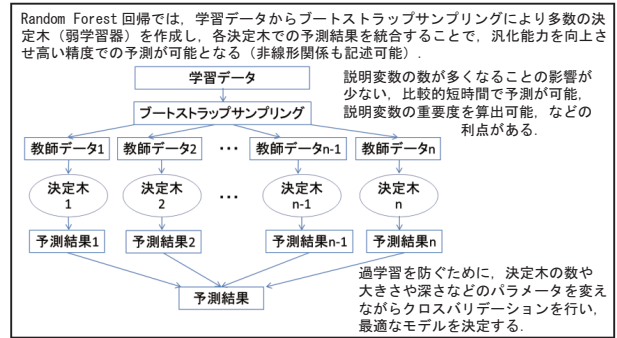


図-5 Random Forest 回帰モデル

表-2 線形重回帰モデルの回帰係数の推定値

| 説明変数                | ①      | ②-1    | ②-2    | ③-1   | ③-3   | ③-4 | ③-5   | ③-6    | 死亡者全体  | 避難困難者全体 |
|---------------------|--------|--------|--------|-------|-------|-----|-------|--------|--------|---------|
| 定数                  | 19.9   | 5.6    | 131.0  | 5.5   | 14.1  | 2.0 | 3.7   | 16.9   | 16.8   | 37.9    |
| (Evc)避難完了者割合        | 0.2    | -1.9   | -0.1   | 3.9   |       |     | -0.2  | -0.3   | -0.8   | -3.0    |
| (1)滞留者数             | 1.0    |        | 1142.9 | 83.4  | 616.4 |     | 59.8  | 112.7  | 189.0  | 283.0   |
| (2)建物数              |        | 4.5    |        |       |       | 0.0 |       |        |        |         |
| (全壊)全壊建物割合          | -410.7 | 0.3    |        | 4.2   | -5.2  | 0.0 | 1.9   | 3.5    | -7.7   |         |
| (閉塞)閉塞道路割合          | -271.6 |        |        |       |       |     |       |        |        |         |
| (焼損)焼損建物割合          |        | 41.1   | 177.3  |       |       | 0.5 | -0.1  | -0.2   | 99.7   | -97.7   |
| (Evc)×(1)           |        | -120.2 | -31.8  | -80.4 |       |     | -58.3 | -109.7 | -136.1 | -256.7  |
| (Evc)×(2)           |        | -4.3   |        |       |       |     |       |        |        |         |
| (Evc)×(全壊)          |        |        |        | 5.9   | 5.8   |     |       |        |        | 11.0    |
| (全壊)×(1)            |        |        |        | 7.8   | -46.4 |     |       |        |        | 5.6     |
| (全壊)×(2)            |        |        |        |       |       | 0.1 |       |        |        |         |
| (Evc)×(焼損)          |        | 38.2   | 172.7  |       |       |     |       |        | -89.9  | 191.0   |
| (焼損)×(1)            |        |        | -173.8 |       |       |     |       |        |        | 142.1   |
| (焼損)×(2)            |        | 193.9  |        |       |       | 0.0 |       |        |        |         |
| (全壊)×(焼損)           |        | 20.2   |        |       |       |     | 0.2   | 1.7    | -3.3   | -6.7    |
| (Evc)×(1)×(全壊)      |        |        |        | 16.9  | 149.1 |     |       |        |        | -4.5    |
| (Evc)×(1)×(焼損)      |        |        | 162.3  |       |       |     |       |        |        | -137.7  |
| (Evc)×(2)×(焼損)      |        | -183.2 |        |       |       |     |       |        |        |         |
| (Evc)×(全壊)×(焼損)     |        | 20.6   |        |       |       |     |       |        |        |         |
| (1)×(全壊)×(焼損)       |        |        |        |       |       |     |       |        |        | 88.4    |
| (2)×(全壊)×(焼損)       |        |        |        |       |       | 5.4 |       |        |        |         |
| (Evc)×(1)×(全壊)×(焼損) |        |        |        |       |       |     |       |        |        | 27.1    |

※各説明変数は基準化済みの値を使用。丸数字は滞留者の分類 (表-1) に対応。  
※係数はいずれも 0.1%水準で有意。

表-3 場所別にみた死亡者数 (要因別)・避難困難者数推定モデルの精度

| ※MSE: Mean Squared Error (平均二乗誤差) | 線形重回帰  |        |                |       | Random Forest回帰 |        |                |       |
|-----------------------------------|--------|--------|----------------|-------|-----------------|--------|----------------|-------|
|                                   | MSE    |        | R <sup>2</sup> |       | MSE             |        | R <sup>2</sup> |       |
|                                   | 学習     | テスト    | 学習             | テスト   | 学習              | テスト    | 学習             | テスト   |
| ① 避難完了者                           | 5883.9 | 5955.1 | 0.998          | 0.998 | 1947.8          | 5580.7 | 0.999          | 0.998 |
| ②-1 火災による死亡者 (街路上)                | 68.6   | 62.8   | 0.801          | 0.813 | 11.8            | 30.2   | 0.966          | 0.908 |
| ②-2 避難困難者 (街路上)                   | 367.6  | 350.9  | 0.901          | 0.904 | 55.0            | 98.4   | 0.985          | 0.973 |
| ③-1 即死者 (圧死)・瀕死者                  | 22.5   | 22.3   | 0.656          | 0.659 | 9.9             | 15.8   | 0.848          | 0.759 |
| ③-3 救出者                           | 267.7  | 273.2  | 0.678          | 0.675 | 34.6            | 90.7   | 0.958          | 0.895 |
| ③-4 火災による死亡者 (建物内)                | 14.2   | 14.2   | 0.717          | 0.710 | 5.6             | 9.6    | 0.888          | 0.809 |
| ③-5 負傷による死亡者 (建物内)                | 29.6   | 31.1   | 0.399          | 0.401 | 10.0            | 16.1   | 0.799          | 0.674 |
| ③-6 避難困難者 (建物内)                   | 86.2   | 90.0   | 0.448          | 0.447 | 10.6            | 38.6   | 0.933          | 0.753 |
| 死亡者全体                             | 144.9  | 140.4  | 0.843          | 0.846 | 27.3            | 70.2   | 0.970          | 0.925 |
| 避難困難者全体                           | 360.3  | 350.1  | 0.923          | 0.925 | 49.3            | 112.8  | 0.989          | 0.976 |

に、線形重回帰モデルと Random Forest 回帰モデルの比較結果を表-3 にそれぞれ示してある。両モデルとも、避難完了者数を高い精度で推定できている。線形重回帰モデルは、変数間の交互作用を考慮することで、街路上の人的被害を精度良く推定できているものの、建物内の人的被害の推定精度は高くない。人的被害の発生メカニズムには様々な要因が複雑に関係することから、線形重回帰モデルでの推定には限界があるものと考えられる。一方、Random Forest 回帰モデルはやや過学習の傾向にあるが、推定精度は全体的に高い。シミュレー



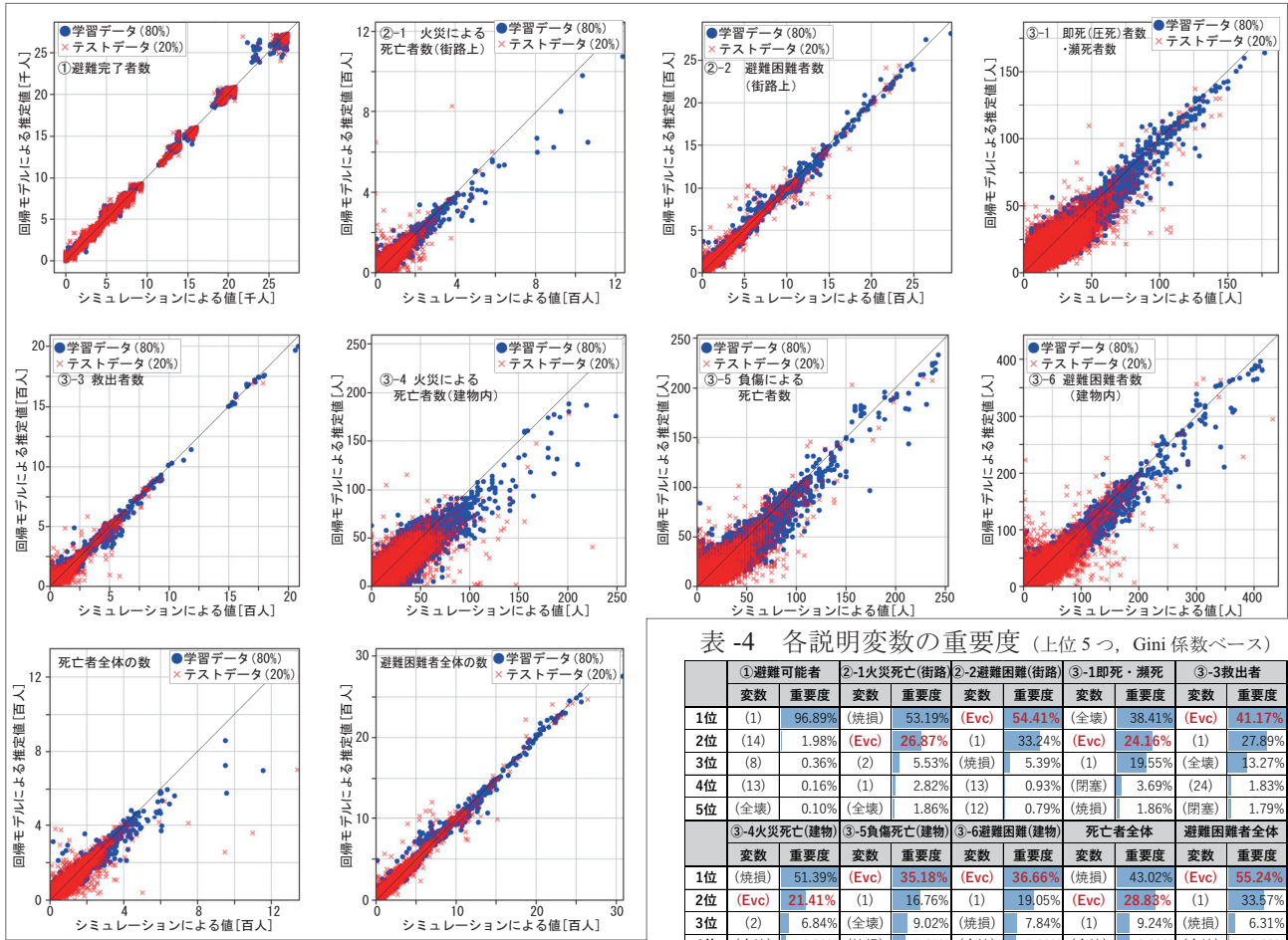


図-6 場所別にみた死亡者数(要因別)・避難困難者数の推定精度の比較 (Random Forest 回帰モデル)

表-4 各説明変数の重要度(上位5つ, Gini 係数ベース)

|    | ①避難完了者      |        | ②-1火災死亡(街路) |        | ②-2避難困難(街路) |        | ③-1即死・瀕死 |        | ③-3救出者  |        |
|----|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|----------|--------|---------|--------|
|    | 変数          | 重要度    | 変数          | 重要度    | 変数          | 重要度    | 変数       | 重要度    | 変数      | 重要度    |
| 1位 | (1)         | 96.89% | (焼損)        | 53.19% | (Evc)       | 54.41% | (全壊)     | 38.41% | (Evc)   | 41.17% |
| 2位 | (14)        | 1.98%  | (Evc)       | 26.87% | (1)         | 33.24% | (Evc)    | 24.16% | (1)     | 27.89% |
| 3位 | (8)         | 0.36%  | (2)         | 5.53%  | (焼損)        | 5.39%  | (1)      | 19.55% | (全壊)    | 13.27% |
| 4位 | (13)        | 0.16%  | (1)         | 2.82%  | (13)        | 0.93%  | (閉塞)     | 3.69%  | (24)    | 1.83%  |
| 5位 | (全壊)        | 0.10%  | (全壊)        | 1.86%  | (12)        | 0.79%  | (焼損)     | 1.86%  | (閉塞)    | 1.79%  |
|    | ③-4火災死亡(建物) |        | ③-5負傷死亡(建物) |        | ③-6避難困難(建物) |        | 死亡者全体    |        | 避難困難者全体 |        |
| 1位 | (焼損)        | 51.39% | (Evc)       | 35.18% | (Evc)       | 36.66% | (焼損)     | 43.02% | (Evc)   | 55.24% |
| 2位 | (Evc)       | 21.41% | (1)         | 16.76% | (1)         | 19.05% | (Evc)    | 28.83% | (1)     | 33.57% |
| 3位 | (2)         | 6.84%  | (全壊)        | 9.02%  | (焼損)        | 7.84%  | (1)      | 9.24%  | (焼損)    | 6.31%  |
| 4位 | (全壊)        | 4.39%  | (焼損)        | 7.45%  | (全壊)        | 7.18%  | (全壊)     | 9.09%  | (全壊)    | 0.60%  |
| 5位 | (1)         | 2.81%  | (閉塞)        | 5.03%  | (8)         | 5.08%  | (2)      | 3.32%  | (12)    | 0.42%  |

※Random Forest 回帰モデル。変数のカッコ付き番号は図-3に対応。

シミュレーションモデル(図-1)で求めた人数と Random Forest 回帰モデルで推定した人数を比較した2変数プロット図を見ても、推定精度が良好であることがわかる(図-6)。Gini 係数に基づき各説明変数の重要度を調べると(表-4)、避難完了者数(Evc)や滞留者数、全壊建物割合や焼損建物割合の説明力が高い。これらは、線形重回帰モデルで選択された説明変数と一致している。

#### 4. まとめ

Random Forest 回帰モデルを用いて、大地震時の避難完了者数と要因別人的被害を精度良く推計可能なモデルを構築した。今後、残差分析を行うことで、モデルのさらなる精度向上に取り組む予定である。

謝辞 本研究は、CREST, JSTの助成に基づく研究成果(JPMJCR1411)の一部である。

#### 注

- 1) 整備地域は、地域危険度が高く、老朽化した木造建築物が特に集積するなど、震災時に特に甚大な被害が想定される地域として東京都が指定するものである(平成28年3月時点で28地域、約6,900ha)。
- 2) 市街地火災による被害が最も深刻になるとされ、国や自治体の被害想定でも多く用いられている「冬の平日18時」に発災することを想定した(各メッシュ内の滞留者数や出火件数もこの想定に基づく)。火災延焼に影響を及ぼす風向・風速は、東京都(2012)の被害想定を参考に「北風8m/s」とした。
- 3) 本稿での線形重回帰と Random Forest 回帰のモデル推定には、Python 3.7.3 および機械学習パッケージ scikit-learn、統計パッケージ statsmodels を用いた。

#### 参考文献

沖拓弥・大佛俊泰・坂本遥峰(2018): シミュレーションに基づく大地震時の物的・人的被害推計結果と市街地性状の関連分析, 地理情報システム学会講演論文集, B-2-4.

T. Oki, T. Osaragi and Y. Sakamoto (2019): Quick Estimation Method of Property Damage and Human Casualty in the Event of a Large Earthquake, Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data 4), 14, 3, 478-488.

坂本遥峰・大佛俊泰・沖拓弥(2018): 広域避難シミュレータの開発と大地震時の物的・人的被害の地域間比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1012-1013.

T. Osaragi and T. Oki (2017): Wide-Area Evacuation Simulation Incorporating Rescue and Firefighting by Local Residents, Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data 2), 12, 2, 296-310.

東京都(2016): 防災都市づくり推進計画(改定)(平成28年3月), <http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/bosai4.htm> (2019.08.30 参照)。

東京都(2018): 地震に関する地域危険度測定調査(第8回), [http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa\\_6/home.htm](http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm) (2019.08.30 参照)。

N. Hirokawa and T. Osaragi (2016): Earthquake Disaster Simulation System: Integration of Models for Building Collapse, Road Blockage, and Fire Spread, Journal of Disaster Research (Special Issue on Disaster and Big Data), 11, 2, 175-187.

東京都(2012): 首都直下地震等による東京都の被害想定, <https://www.bosai.metro.tokyo.lg.jp/taisaku/torikumi/1000902/1000401.html> (2019.8.30 参照)。