

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	2016年熊本地震における益城町の解体建物データベースの構築と災害廃棄物量推計に関する研究
Title(English)	Study on Development of Demolished Building Database in Mashiki Town after the 2016 Kumamoto Earthquake and Estimation Method of Disaster Waste
著者(和文)	串山傳
Author(English)	Yuzuru Kushiyama
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11734号, 授与年月日:2022年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:松岡 昌志,元結 正次郎,盛川 仁,室町 泰徳,山中 浩明,淺輪 貴史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11734号, Conferred date:2022/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

令和3年度 学位論文

2016年熊本地震における益城町の
解体建物データベースの構築と
災害廃棄物量推計に関する研究

東京工業大学大学院

総合理工学研究科 人間環境システム専攻

串山 傳

指導教員 松岡 昌志 教授

要旨

本論文は、「2016年熊本地震における益城町の解体建物データベースの構築と災害廃棄物量推計に関する研究」と題し、以下の6章により構成している。

第1章「序論」では、大規模災害により損壊した建物を解体する必要性が生じ、自治体が災害廃棄物処理計画を立案する際に用いる災害廃棄物発生量推計方法の問題点及び本研究の目的について述べている。既往の災害廃棄物発生量の推計方法は被害建物棟数と被害建物1棟当りの災害廃棄物量原単位を用いて災害廃棄物発生量を推計する。2016年熊本地震後の災害廃棄物処理計画策定時に推計した災害廃棄物発生量は約200万tであったが、2年後処理事業完了時の実際の災害廃棄物処理量は約300万tと乖離があった。既往の推計方法では、乖離の要因が被害建物棟数と実際の解体建物棟数との差か、あるいは災害廃棄物量原単位等の違いに因るのか不明確である。被害が甚大で災害廃棄物量が多いと予想される地域で、災害等廃棄物処理事業の補助制度を適用するためには、市町村の災害廃棄物量の推計根拠や二次仮置場に要求される災害廃棄物処理量を適切に示す必要がある。そこで、本研究では、益城町で解体建物と被害判定結果との関係及び解体建物の構造内訳と延床面積等の建物情報を調査し、建物データベースを作成する。その上で、解体建物棟数を推計する解体率、解体建物の構造内訳及び災害廃棄物量原単位を用いた災害廃棄物発生量推計方法を提案し、推計精度を向上することを目的とした。

第2章「益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成」では、熊本地震後の益城町の全ての解体建物を識別し、被害判定結果と建物情報を含む建物データベースを作成した。この建物データベースは、益城町の全ての建物約16,000棟の輪郭情報を有し、衛星画像の目視判読によって解体建物約5,700棟を識別している。解体と現存を識別する目視判読の際、解体された可能性を示す画像解析指標を作成し参照したことによって、目視作業を効率的に実施した。更に、被害判定結果、家屋台帳のデータ及び現地写真等を使って、建物データベースに被害判定結果と建物情報を関連付けした。

第3章「益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出」では、益城町の災害廃棄物処理量の実績データを調査し、建物データベースの解体建物の延床面積によって、益城町の木造建物の災害廃棄物量原単位（推計）を算出した。瓦屋根と瓦屋根以外の木造建物の災害廃棄物量原単位（推計）は0.57 (t/m²) と 0.51 (t/m²) である。一方、非木造の解体建物棟数が少なかったため、非木造の災害廃棄物量原単位（推計）を算出せず、本研究の推計ではモデル解体調査の結果を用いることとした。本研究で算出した、木造建物の災害廃棄物量原単位は、益城町全体の災害廃棄物処理量を全ての解体建物の延床面積によって平均して得られた結果であることから、第1章で提案した災害廃棄物量推計式に用いることができる。

第4章「益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析」では、益城町の建物データベースから、被害別の解体率を分析した。既往の推計方法では全壊建物を全て解体と扱ってい

要旨

るが、分析結果では、全壊建物、大規模半壊・半壊建物、並びに一部損壊建物の解体率は約 85%、約 30%、約 10%であった。解体建物の内、約 45%は住家以外の建物であったが、自治体の報告による被害建物棟数は住家の被害建物棟数であるため、住家の被害建物棟数に解体率と益城町全体の建物棟数と住家建物の比（建物係数）を乗じて住家以外も含む解体建物棟数を推計する方法を提案し、益城町の解体建物棟数に近い値で推計できることを明らかにした。また、建築年代が新しいほど解体率が低くなる傾向を示したものの、新しい建築年代の解体建物の割合が少ないことから、建築年代別に細分化した解体率としない。一方、自治体の報告による被害建物棟数は、住家を対象にしている。解体建物の構造内訳は、瓦屋根木造、瓦以外の木造建物、LS造/S造、その他、RC造/CB造の順に、75%、13%、6%、5%、1%であった。4章で得た係数と第3章で算出した災害廃棄物量原単位を用いて提案した災害廃棄物量推計方法により推計した結果、益城町の災害廃棄物処理量に近い値となることを示した。

第5章「熊本地震における解体率を用いた災害廃棄物発生量の推計と実績の比較」では、第4章までで求めた、解体率、建物係数、解体建物の構造内訳と災害廃棄物量原単位を用いて、熊本地震による被害が甚大で二次仮置場を必要とした8市町村を対象として、住家被害建物棟数を入力し災害廃棄物発生量を推計した結果、既往の推計結果に比べて実績値と相関が高く、市町村別の残差も設定した要求精度以内であることを示した。本研究の推計方法では、一部損壊建物の解体率及び住家以外の解体建物棟数を考慮していることによって、推計精度が向上したと考える。ただし、非住家の解体が多い市町村や一部損壊建物からの解体建物が少ない市町村では、推計値の過少・過多が生じる場合がある。本研究の災害廃棄物量推計式の係数の中で、一部損壊の解体率と解体建物の構造内訳が災害廃棄物量の変動に与える影響が大きい。本研究の推計方法を用いて、南海トラフ巨大地震による強い揺れが予想され、木造建物の割合が全国平均に近い地域において災害廃棄物発生量の推計も行った。また、速報の被害建物棟数を入力値として、同様に推計する実験を行った結果、推計値が実績値の約 1.5 倍となった。この差は入力値の速報の被害建物棟数が大きいことによる問題であるが、地震発生後早い時間で災害廃棄物発生量を推計できる手段を示すことができた。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、木造建物の割合が低い都心部等で解体建物の構造内訳の研究課題があること、並びに南海トラフように強い揺れが予想され、災害等廃棄物処理事業の補助制度を適用する場面での利用想定について述べている。

以上を要するに、本論文では、益城町全ての解体建物の被害判定結果、構造種別、延床面積等を格納した建物データベースを作成し、解体率及び解体建物の災害廃棄物量原単位を用いた災害廃棄物発生量推計方法によって、既往の被害建物棟数とその災害廃棄物量原単位で災害廃棄物量を推計する方法に比べて、災害廃棄物発生量の推計精度が向上することを明らかにしたものである。

Study on Development of Demolished Building Database in Mashiki Town after the 2016 Kumamoto Earthquake and Estimation Method of Disaster Waste

Abstract

In this thesis titled “Study on Development of Demolished Building Database in Mashiki Town after the 2016 Kumamoto Earthquake and Estimation Method of Disaster Waste”, a creating a building database to clarify demolition and remaining from all buildings in Mashiki Town and the estimation method for a disaster waste amount using a ratio of demolished buildings to damage buildings were proposed. It was necessary to investigate weight units of waste per building, the proportion of structure types, and floor areas of the demolished buildings for the proposed method.

In the introduction, it explained the problems on the existing estimation method for disaster waste amount depending on the number of damaged buildings. Indeed, the weight amount of disaster waste estimated after the 2016 Kumamoto Earthquake was significantly different from the actual amount.

Chapter 2 showed the building database identifying 5701 demolished buildings from 16 thousand buildings in Mashiki town by analysis using satellite imageries. Building information of the database was connected to damage level, total floor area, and structure typologies.

In chapter 3, the weight units of waste per building were derived. Those units were 0.57 (t/m²) for wooden buildings with tiled-roofs and 0.51 (t/m²) for wooden buildings with non-tiled-roofs. However, since the number of non-wooden demolition buildings was less, the unit for the non-wooden buildings could not be calculated.

In Chapter 4, the demolition rates for severely damaged, moderately damaged, and minor damaged buildings were calculated as approximately 85%, 30%, and 10% respectively. It was also possible to estimate the number of demolished buildings including non-residential houses by using the demolition ratio multiplied by a ratio of all buildings to residential houses in the database. The proportions of wooden and other structures on demolished buildings were also derived as approximately 90% and 10%.

In Chapter 5, the number of demolition buildings and the amount of disaster waste were estimated by inputting the number of residential damaged houses by the 2016 Kumamoto Earthquake into the proposed method with the demolition rates. The estimation accuracy was consequently improved than the existing estimation method.

Abstract

The demolition rates and the structure proportions on demolished buildings affect the amount of disaster waste in this estimation method. The estimation by inputting real-time earthquake damage information was also demonstrated.

In the last chapter, summaries of the results, use cases on a large-scale disaster, and future issues were described.

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景.....	1
1.1.1 災害廃棄物処理とは.....	1
1.1.2 災害廃棄物処理の流れ.....	2
1.1.3 災害廃棄物処理に関する処理担当.....	3
1.2 既往の災害廃棄物量の調査と推計方法.....	4
1.3 熊本地震の被害と災害廃棄物発生量.....	7
1.3.1 自治体の被害建物棟数に基づく災害廃棄物発生量の推計と実績の差....	8
1.3.2 被害建物棟数と災害廃棄物処理量の推移.....	9
1.3.3 災害等廃棄物処理事業の財政補助と災害廃棄物量推計の関係.....	11
1.4 既往の災害廃棄物発生量推計方法における問題点と課題の整理.....	11
1.4.1 既往の災害廃棄物発生量推計方法における問題点.....	11
1.4.2 本研究の目的と課題.....	12
1.5 本論文の構成.....	18
1.6 序論のまとめ.....	20
参考文献(第1章).....	21
第 2 章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成	25
2.1 はじめに.....	25
2.2 地図データと衛星画像を使った解体建物の識別と建物データベース作成....	26
2.2.1 建物データベースに使用する GIS データ.....	27
2.2.2 解体建物の全数調査に使用する衛星データ.....	30
2.2.3 解体建物付近の画像の特徴と画像解析指標の作成.....	32
2.2.4 画像解析指標の評価.....	46
2.2.5 画像解析指標を参照した益城町全体の解体建物の目視判読.....	47
2.2.6 画像解析指標で誤分類となる要因と考察.....	52
2.3 建物データベースと被害判定の関係付け.....	59
2.4 現地写真及び Google Earth による解体建物の建物情報の調査.....	61
2.5 解体建物の建物データベース作成結果.....	62
2.6 本章のまとめ.....	62
参考文献(第2章).....	64

第 3 章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出	67
3.1 はじめに.....	67
3.2 モデル解体調査による災害廃棄物量原単位	68
3.3 益城町の災害廃棄物量	70
3.3.1 災害廃棄物の収集先	70
3.3.2 片付けごみと解体建物に由来する災害廃棄物	71
3.3.3 解体建物から排出された災害廃棄物量	71
3.4 災害廃棄物量原単位の算出式	73
3.5 災害廃棄物量原単位の算出	75
3.5.1 解体建物1棟当り災害廃棄物量原単位の算出	75
3.5.2 延床面積当り組成別災害廃棄物量原単位の推計	76
3.6 本研究の災害廃棄物量原単位とモデル解体調査結果の比較と考察	80
3.7 本章のまとめ	82
参考文献(第3章)	83
第 4 章 益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析	85
4.1 はじめに.....	85
4.2 被害別の解体率.....	85
4.3 解体されなかった全壊建物と解体された無被害建物の分析	86
4.3.1 災害廃棄物処理事業完了後に解体された建物	86
4.3.2 全壊建物の応急修理	87
4.3.3 無被害で解体された建物.....	88
4.4 被害・建築年代別の解体率.....	89
4.5 住家以外の建物も含めた解体建物の推計	91
4.6 解体建物の建物構造内訳と構造別延床面積の算出	92
4.7 算出した係数を用いた益城町の災害廃棄物発生量の推計	94
4.8 本章のまとめ	95
参考文献(第4章)	96
第 5 章 熊本地震における解体率を用いた災害廃棄物発生量の推計と実績の比較	97
5.1 はじめに.....	97
5.2 解体建物棟数と災害廃棄物発生量の推計式	98
5.3 災害廃棄物発生量推計式に用いる係数.....	99
5.4 自治体の被害調査に基づく災害廃棄物量の推計と実績の比較	101
5.4.1 対象市町村	101

5.4.2 自治体の住家被害建物棟数による解体建物棟数の推計と実績	102
5.4.3 自治体の住家被害建物棟数による災害廃棄物発生量の推計と実績....	103
5.4.4 災害廃棄物量推計式における係数の変化による推計量への影響	106
5.4.5 大規模な地震における利用想定と適用限界	107
5.5 地震後被害速報を利用した災害廃棄物発生量推計の実験	110
5.5.1 被害速報の被害建物棟数による解体建物棟数の推計	110
5.5.2 被害速報を利用した災害廃棄物発生量の推計の実験	113
5.6 本章のまとめ	115
参考文献(第5章)	116
第6章 結論.....	117
6.1 本研究のまとめ	117
6.2 課題と適用範囲.....	118
6.3 本研究成果の利用想定	119
参考文献(第6章)	119
本研究に関連した論文及び国際会議発表.....	121
本研究に関連した論文	121
国際会議発表.....	121

図リスト

図 1-1	災害廃棄物処理の流れ	2
図 1-2	集積された災害廃棄物及び火災発生時の消火作業の様子	3
図 1-3	大規模地震災害により生じる廃棄物・ごみ種類と処理分担	3
図 1-4	モデル解体調査によるサンプル調査のイメージ	4
図 1-5	既往の木造建物の災害廃棄物量原単位（モデル解体調査）	5
図 1-6	全ての解体建物についてモデル解体調査を実施するイメージ	6
図 1-7	熊本地震の発生場所と益城町の位置関係	8
図 1-8	熊本地震後の災害廃棄物処理計画時と処理完了時の災害廃棄物量	9
図 1-9	益城町の被害建物棟数、解体建物棟数及び災害廃棄物処理量の時間変化 ...	10
図 1-10	熊本県の各市町村の住宅棟数と木造建物の割合	13
図 1-11	益城町の解体建物の全数調査と災害廃棄物発生量推計式の関係	13
図 1-12	全解体建物の建物情報と災害廃棄物の総量の調査による原単位の算出	16
図 1-13	論文の構成と進め方	18
図 2-1	第 2 章の調査研究対象	25
図 2-2	益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成フロー	27
図 2-3	OSM から取得した輪郭情報と属性フィルタの適用	28
図 2-4	OSM に記録されていない建物の追加	29
図 2-5	益城町の全ての建物と解体建物と OSM データの建物の包含関係	30
図 2-6	補正済み衛星画像の位置と OSM データ建物輪郭位置の確認	31
図 2-7	現存建物と解体建物の跡地の現地撮影写真	32
図 2-8	現地調査に基づく解体建物確認場所	33
図 2-9	建物輪郭内の衛星画像の画素値のヒストグラム分布	36
図 2-10	現地調査で確認した箇所の衛星画像と Binary 画像	41
図 2-11	衛星画像に重畳した画像解析指標の分布	45
図 2-12	画像解析指標の閾値による分類結果の ROC カーブ	47
図 2-13	参照した画像解析指標と解体建物の目視判読結果	49
図 2-14	解体建物と解体時期の分布	51
図 2-15	画像解析指標で解体建物を多く推定（TP）した部分	53
図 2-16	画像解析指標で現存建物を多く推定（TN）した例	54
図 2-17	屋根のソーラーパネル等の反射により解体建物（FP）に誤分類した例	55
図 2-18	建物の壁や屋根からの反射光により解体建物に誤分類（FP）した例	56
図 2-19	建物輪郭内の面積が小さく現存建物として誤分類した例	58
図 2-20	被害判定結果の建物輪郭情報への関連付けの例	60
図 2-21	益城町の建物データベースの関連付けた情報と件数	62
図 3-1	第 3 章の調査研究対象	67

図表リスト

図 3-2 災害廃棄物量と災害廃棄物量原単位の関係	67
図 3-3 損壊建物の解体作業の様子	69
図 3-4 益城町の災害廃棄物の仮置場と処分場	71
図 3-5 益城町の解体建物による月毎の災害廃棄物処理量（実績）	72
図 3-6 解体建物の構造別の延床面積内訳.....	76
図 3-7 本研究とモデル解体調査の災害廃棄物量原単位の比較.....	81
図 4-1 第4章で分析する災害廃棄物量推計式の係数.....	85
図 4-2 災害廃棄物処理完了後に解体された建物の例.....	87
図 4-3 無被害の建物が周辺建物と一緒に解体されたと推測した例.....	89
図 4-4 被害・建築年代別の解体率と解体建物棟数	90
図 4-5 住家以外も含む解体建物棟数の推計方法.....	91
図 5-1 第5章の調査研究対象	97
図 5-2 分析した係数と災害廃棄物量推計式への適用の関係	98
図 5-3 推計と実績の比較対象8市町村	101
図 5-4 対象8市町村の解体建物棟数の実績と推計棟数	102
図 5-5 市町村別の災害廃棄物量の実績と既存の推計と本研究の推計	103
図 5-6 災害廃棄物量の実績に対する既存の推計と本研究の推計の相関	104
図 5-7 被害建物棟数と解体建物棟数（実績）と本研究の解体建物棟数（推計） ..	105
図 5-8 災害廃棄物量推計式の係数の増減影響	106
図 5-9 南海トラフ地震と首都直下地震の想定被害地域の木造建物の割合の分布 ..	108
図 5-10 南海トラフ地震を想定した静岡県各市町村別の災害廃棄物量	109
図 5-11 REIC速報の全半壊棟数推計値と実際の被害建物棟数の相関.....	110
図 5-12 対象8市町村の解体建物棟数の実績と速報を使った推計棟数	112
図 5-13 REIC速報の全壊建物棟数と自治体の全壊建物棟数.....	112
図 5-14 市町村別の災害廃棄物量の実績と速報を使った既存と本研究の推計.....	113

表リスト

表 1-1	過去の大規模災害の災害廃棄物発生量	1
表 1-2	災害種類による災害廃棄物の特徴.....	2
表 1-3	被害建物 1 棟当りの災害廃棄物量原単位（推計）	6
表 1-4	本研究の災害廃棄物発生量推計に関する用語の説明	14
表 1-5	問題点、研究課題と章の対応.....	19
表 2-1	解体建物の調査に使用した衛星画像一覧.....	31
表 2-2	画像解析指標による解体建物分類の混同行列.....	46
表 2-3	本研究の目視判読結果と益城町の報告の解体建物数比較	52
表 2-4	建物輪郭面積 60m ² 以下の建物に対して指標の閾値 0.3 で分類した混同行列	57
表 2-5	建物輪郭面積 60m ² 超の建物に対して指標の閾値 0.3 で分類した混同行列 ..	57
表 2-6	建物輪郭面積の違いによる評価値.....	57
表 2-7	建物構造種類	59
表 2-8	建物データベースに被害判定と建物情報の関連付け件数	61
表 3-1	益城町の災害廃棄物処理事業完了時の組成別災害廃棄物処理量（実績） ...	73
表 3-2	益城町の構造別解体建物の棟数と延床面積	73
表 3-3	熊本地震モデル解体調査による組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位	77
表 3-4	益城町の木造建物の組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位	80
表 4-1	益城町の建物データベースによる被害別の解体率.....	86
表 4-2	益城町の建物の用途及び被害判定有無の内訳.....	91
表 4-3	益城町の解体率と建物係数を使って推計した解体建物棟数.....	92
表 4-4	益城町の解体建物の建物構造内訳.....	92
表 4-5	益城町の建物構造と被害別の解体率	93
表 4-6	益城町の解体建物の構造別割合と面積内訳推計	94
表 4-7	益城町の構造別延床面積、原単位及び災害廃棄物発生量の推計値.....	95
表 5-1	解体建物棟数推計に用いる被害別の解体率	99
表 5-2	住宅・土地統計調査の住家棟数と REIC の建物棟数による建物係数	100
表 5-3	災害廃棄物量推計式に適用する構造内訳と延床面積平均値.....	100
表 5-4	災害廃棄物量推計式に適用する災害廃棄物量現原単位.....	101
表 5-5	災害廃棄物量推計式の係数の変動による災害廃棄物量の変化率	107
表 5-6	南海トラフ地震を想定した静岡県被害建物と解体建物と災害廃棄物量 ..	109
表 5-7	REIC 速報の全壊・半壊棟数と一部損壊建物棟数の推定値	111

付録

付録 1 解体建物の全数調査結果を使った画像解析指標の評価

付録 2 解体建物棟数及び災害廃棄物量の推計値一覧

第1章 序論

1.1 研究の背景

日本では、地震、津波、台風、洪水、火山等の様々な種類の災害が起きている。平成になってから、大規模な地震災害を挙げれば、1995年の阪神・淡路大震災、2011年の東日本大震災、2016年の熊本地震が起きていて、多くのインフラ設備、工場、家屋等が被害を受けた。大規模な災害が発生した直後は、人命救助や被災者の避難生活支援ということが第一に優先される。その後、復旧・復興へと移行していくためには、被害を受けた建物を解体し、廃棄することが必要である。解体建物から排出される廃棄物のことを災害廃棄物といい、これらを安全かつ迅速に処理することが、復旧・復興につながっていく。自治体等が、災害廃棄物処理を迅速に進めるためには、災害廃棄物発生量を推計し、災害廃棄物処理計画をいち早く立案することが重要である。序論では、災害廃棄物処理の背景、並びに既往の災害廃棄物発生量の推計方法とその問題点を示した後、本研究の目的と本論文の構成を示す。

1.1.1 災害廃棄物処理とは

はじめに、災害廃棄物処理について説明する。冒頭述べたように、大規模な災害が発生した後、二次被害発生の事前防止や生活再建のために、損傷の大きい建物や倒壊の危険がある建物は解体され、災害廃棄物として処理される。国内の大規模な地震災害で発生した災害廃棄物発生量¹⁾を表 1-1 に示す。

表 1-1 過去の大規模災害の災害廃棄物発生量

災害	全半壊棟数	災害廃棄物発生量	津波堆積物量
阪神・淡路大震災	249 千棟	約 1500 万 t	-
2011 年東日本大震災	405 千棟	約 2000 万 t	約 1100 万 t
2016 年熊本地震	43 千棟	約 300 万 t	-

ここで、災害廃棄物発生量とは、災害により発生した災害廃棄物の全体量のことであり、環境省の災害廃棄物対策指針²⁾では、災害廃棄物は被災家屋から排出される片付けごみ及び損壊建物の解体等に伴い排出される廃棄物から構成されると述べている。表 1-2 に示すように、災害の種類によって発生する災害廃棄物の特徴に違いがある。本研究では、地震・揺れによる災害廃棄物を対象にする。

表 1-2 災害種類による災害廃棄物の特徴

災害種類	災害廃棄物の特徴
地震・揺れ	損傷した建物が解体され、構造材（木材、コンクリート、金属等）が廃棄物となる。破損した家具・家電製品や汚れた布団・畳等も排出される。解体される建物が多いと災害廃棄物量が大量に発生する。
地震・津波	揺れによる廃棄物に加え、津波堆積物の混在や海へ流出する場合がある。津波や浸水の影響を受けた家電・家具等が廃棄物となる。
浸水	浸水した家具・家電製品、布団・畳等が主な廃棄物である。 浸水被害が大きい（全壊・半壊判定の）建物を解体する場合がある。

1.1.2 災害廃棄物処理の流れ

解体建物から排出される災害廃棄物は、図 1-1 に示すように仮置き場に収集され、一時保管される。その後中間処理を経て、リサイクルや最終処分される。

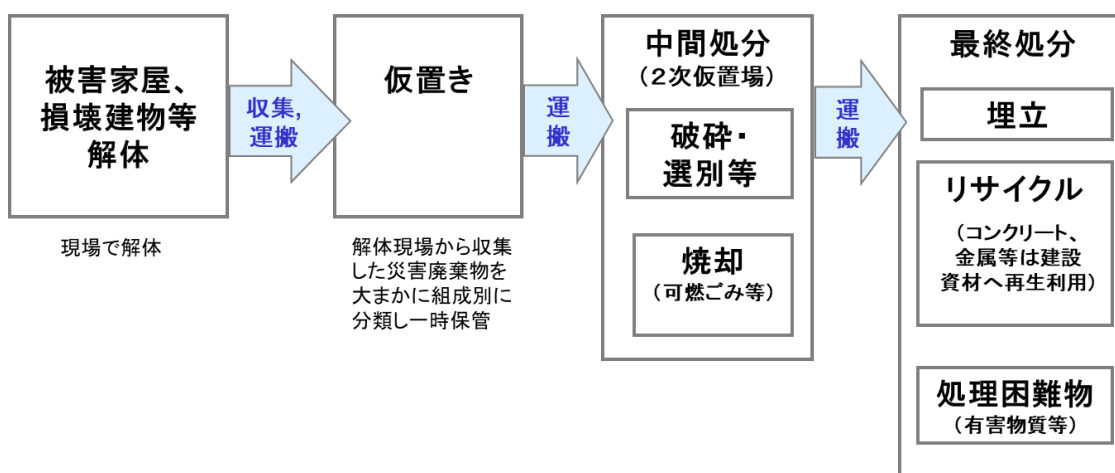


図 1-1 災害廃棄物処理の流れ

図 1-2 は、災害廃棄物が集積された仮置き場の様子や堆積廃棄物から発生した火災の消化作業の様子を写している。このように仮置き場、処分場、処理体制の不足等によって災害廃棄物の処理が適切に進められなければ、解体作業の遅延、仮置き場以外の場所に放置など物理的な問題だけでなく、火災発生、疫病・感染症等の発生及び有害物質の大規模拡散・流出などの新たな問題を引き起こす恐れがある。これらの問題が生じないよう、復旧・復興事業を進めるために、大量に発生した災害廃棄物を適正、円滑かつ迅速に処理することが必要である。



図 1-2 集積された災害廃棄物及び火災発生時の消火作業の様子
 (左写真出典：環境省災害廃棄物対策フォトチャンネル 平成 28 年熊本地震
http://kouikishori.env.go.jp/photo_channel/
 右写真出典：放射能汚染廃棄物以外の災害廃棄物に関する研究概要報告^[3]
https://www.nies.go.jp/fukushima/pdf/hokoku_gaiyosaigai.pdf)

1.1.3 災害廃棄物処理に関する処理担当

廃棄物・ごみ種類に関する処理担当について述べておく。土砂堆積物は国土交通省主導で、生活ごみは自治体主導で処理され、その処理担当は平時も災害時も変わらない。解体建物由来の廃棄物について、平時は所有者が産業廃棄物事業者へ依頼して処理するが、大規模災害が発生し公費解体制度が適用されると、図 1-3 に示すように自治体が処理事業を主体的に進める必要がある。

廃棄物・ごみ種類	処理担当
土砂堆積物	国土交通省
公共構造物(道路、鉄道等)	事業者(産業廃棄物処理へ)
自動車・バイク	所有者(専門処理業者へ)
片付けごみ(家財、家電)	自治体
片付けごみ(リサイクル家電)	自治体認定のリサイクル処理業者
解体建物の廃棄物	大規模災害時(公費解体制度): 自治体 通常時: 所有者が産廃業者等に依頼
生活ごみ、避難所ごみ、し尿	自治体
医療系ごみ	病院等(医療系処理業者へ)

図 1-3 大規模地震災害により生じる廃棄物・ごみ種類と処理分担

そのためには、被害情報の収集、災害廃棄物要処理量の推計、ごみや廃棄物の仮置き場の選定、解体の実施並びに処分場での受入れ等の準備を整え、目標期間中に実施できるような災害廃棄物処理の計画を策定することが必要であると述べられている^[4,5,6]。災害発生後短期間で、災害廃棄物処理の適切な実施計画を立案する必要があり、その規模把握するために、災害廃棄物発生量を推計することが不可欠である。

1.2 既往の災害廃棄物量の調査と推計方法

どのくらいの災害廃棄物量が発生するのか知るために、損壊を受けた建物が解体される際、建物1棟から排出される災害廃棄物量（以下、「災害廃棄物量原単位」という）を計測する調査研究が行われてきた。過去の災害で、損壊した建物が解体される際、図1-4のように、数千件、数万件の解体建物の中から数件の建物をサンプル抽出し、解体時に立ち合い、解体建物1棟から排出される災害廃棄物の計量と組成割合等を調査する方法であり、このような調査をモデル解体調査という。

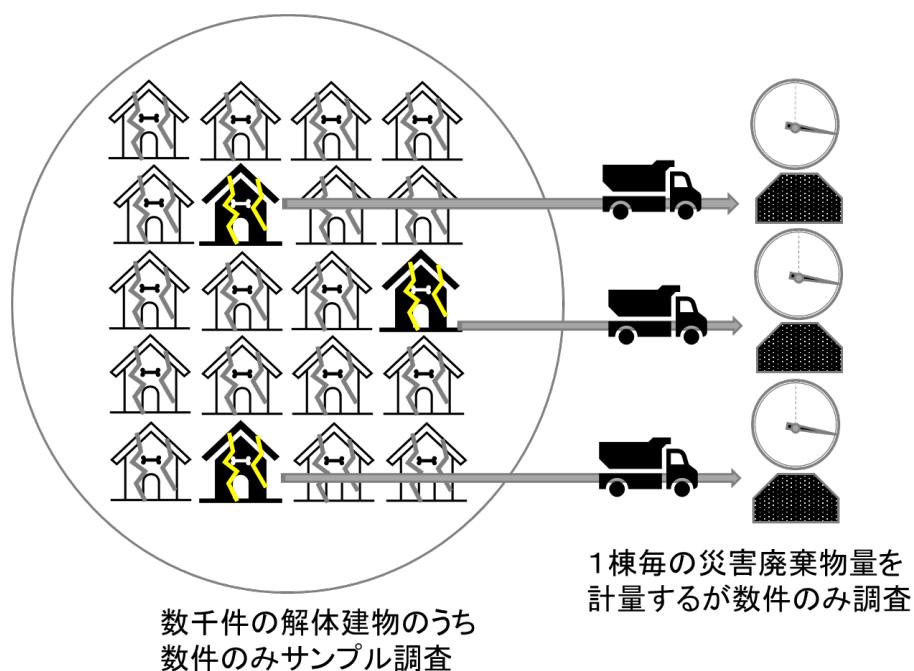


図 1-4 モデル解体調査によるサンプル調査のイメージ

高月ら^[7]は、阪神・淡路大震災後の木造家屋の解体時の調査を行い、解体建物から生じる災害廃棄物の延床面積当り原単位は $0.62\sim 0.71$ (t/m^2) になるとの結果を得た。また、橋本ら^[8]は、木造家屋解体工事の調査を行い、延床面積当り廃棄物原単位は 0.491 ± 0.049 (t/m^2) と算出した。環境省の第2回平成29年度災害廃棄物対策推進検討会の資料^[9]には、甲佐町と熊本市内で行ったモデル解体調査（以下、熊本地震モデル解体調査という）による、木造家屋4棟平均の延床面積当り原単位 0.52 (t/m^2) とその組成内訳が示されている。熊本地震で被害を受けた熊本市内の鉄筋コンクリート造ビル3棟の災害廃棄物の延床面積

第1章 序論

当り原単位の平均が 1.17 (t/m²) であることも調査している。木造建物の延床面積当り災害廃棄物量原単位 (モデル解体調査) を図 1-5 に示す。

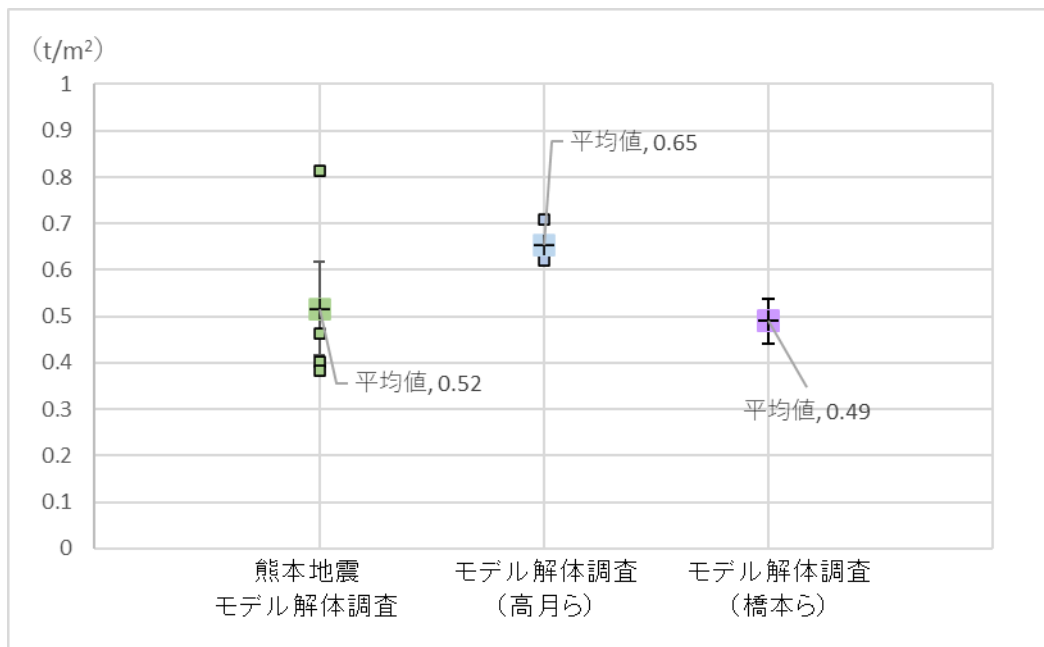


図 1-5 既往の木造建物の災害廃棄物量原単位 (モデル解体調査)

熊本地震モデル解体調査による計測値は、最大値 0.81 (t/m²)、最小値 0.38 (t/m²) と幅がある。モデル解体調査では、建物から発生する災害廃棄物を組成別に分類して、トラック等の運搬時に都度計量し、建物の延床面積も家屋台帳または測量によって分かることから、解体建物 1 棟及び延床面積当り災害廃棄物量原単位を正確に把握できていると考えられる。しかし、地域や建築年代によって使用されている構造材や量が異なることも想定される状況で、数棟程度のサンプル調査で得られた値が、市町村単位の平均的な値となり得るのか疑問が残る。個々の解体建物のモデル解体調査で、図 1-6 のように全ての解体建物について、あるいは数百棟程度のモデル解体調査を行えば、統計的に平均や分布を得られるが、非常に多くの解体作業に立ち会い計量するためには時間、人手、コストを非常に多く費やすため、モデル解体調査のみで統計的な災害廃棄物量原単位の調査を実現することは難しい。

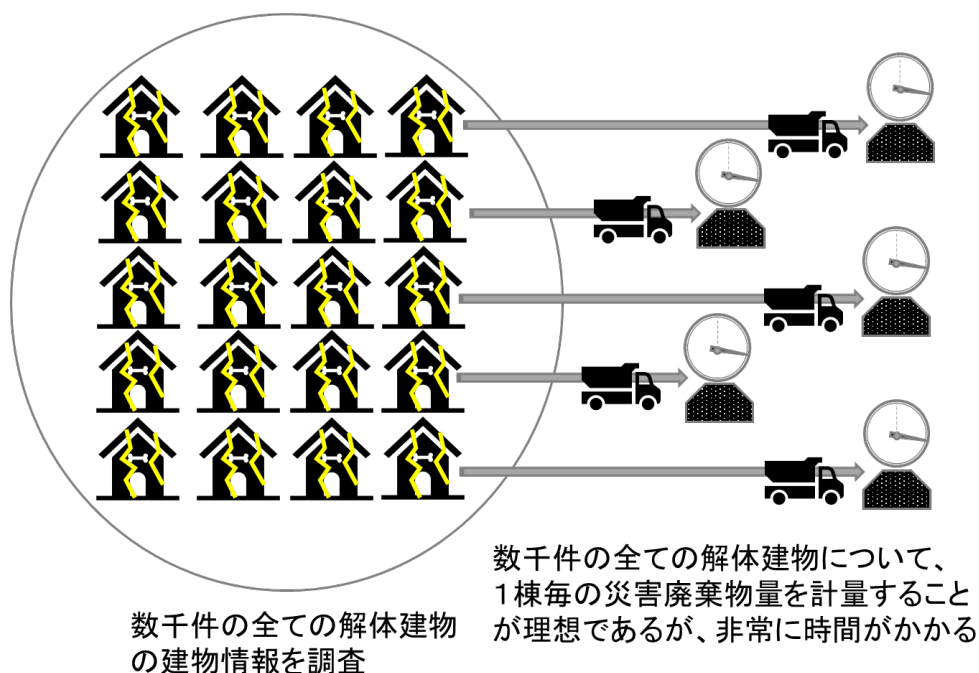


図 1-6 全ての解体建物についてモデル解体調査を実施するイメージ

災害発生時に全体的な規模を知るために、災害廃棄物量を推計方法に関する研究も行われている。

$$\begin{aligned}
 \text{災害廃棄物量} &= \boxed{\text{全壊建物の災害廃棄物量原単位}} \times \boxed{\text{全壊建物棟数}} \\
 &+ \boxed{\text{半壊建物の災害廃棄物量原単位}} \times \boxed{\text{半壊建物棟数}} \quad \dots \text{式 (1-1)}
 \end{aligned}$$

Hirayama et al.^[10] は、阪神淡路大震災で発生した自治体単位の災害廃棄物量と被害建物棟数の関係について回帰分析し、全壊建物棟数と半壊建物棟数に被害建物1棟当りの災害廃棄物量原単位を算出し、災害廃棄物発生量の推計式(1-1)を提案した。また、東日本大震災についても、平山ら^[11] は災害廃棄物量と被害建物棟数から回帰分析を行い、災害廃棄物量原単位を求めた。阪神淡路大震災及び東日本大震災の災害廃棄物量原単位(推計)を表1-3に示す。

表 1-3 被害建物1棟当りの災害廃棄物量原単位(推計)

災害種類		全壊 (t/棟)	半壊 (t/棟)
阪神・淡路大震災	公物含む	113	56.5
	公物含まない	81.9	41.0
東日本大震災		117	23.4

第1章 序論

ここで、図 1-5 の災害廃棄物量原単位（モデル解体）と表 1-3 の被害建物 1 棟当りの災害廃棄物量原単位を比べると、差があることに気づく。総務省が公開している平成 30 年住宅・土地統計調査^[12]の木造 1 棟の平均延床面積を参考にして、木造建物 1 棟の延床面積を 100m² とすれば表 1-3 の全壊建物の原単位を面積換算すると、約 1.1~1.2(t/m²) となる。図 1-5 の災害廃棄物量原単位（モデル解体）と比較すると約 2 倍である。この差の要因が被害建物から解体された棟数の違いなのか、木造以外の構造の建物が多く原単位が大きかったのかわからない。そのため、不確定な要素を減らして原単位を求め、吟味する必要がある。

原単位とは別の問題点として、推計式 (1-1) は被害建物棟数に災害廃棄物量原単位を乗算する式であるが、被害建物棟数と解体建物棟数の差があることから災害廃棄物発生量の推計値が実際と異なる可能性があることも指摘されている^[4]。被害建物棟数と解体建物棟数の関係について、牧ら^[13]が西宮市の阪神・淡路大震災による建物被害と公費解体建物との関係を調査し、大破及び中程度の被害を受けた建物の約 3 分の 2 が解体されたとの研究調査結果があるが、他の調査研究は極めて少ない。解体建物の構造内訳や延床面積等の情報も調べられていない。そのため、被害建物の内、実際に解体された建物棟数、木造や非木造の建物構造、延床面積等が不確定なまま、被害建物に対する係数を設定した災害廃棄物量推計式となっている。しかし、災害廃棄物量推計方法のガイドラインとなっている、環境省の災害廃棄物対策指針【技 14-2】災害廃棄物等の要処理量の推計方法^[14]には、推計式 (1-1) が示されている。更に、中央防災会議で議論された巨大災害時における災害廃棄物対策のグランドデザインの南海トラフ地震で想定する災害廃棄物量^[15]を推計する際には、災害廃棄物量推計式(1-1)と表 1-3 の東日本大震災の災害廃棄物量原単位（推計）が用いられている。

1.3 熊本地震の被害と災害廃棄物発生量

2016 年熊本地震では、図 1-7 に示すように益城町の近くで 2016 年 4 月 14 日に M6.5 および 4 月 16 日 M7.3 の 2 度の大きな地震が発生した。熊本県によると、2016 年熊本地震によって、熊本県では住家・非住家を合わせて約 21 万棟^[16]、益城町では約 1 万 5 千棟^[17]の建物が被害を受けたと報告されている。とくに、益城町は震源に近かったことから、被害建物の内 30%近くが甚大な損傷を受け、多くの建物を解体する必要があった。

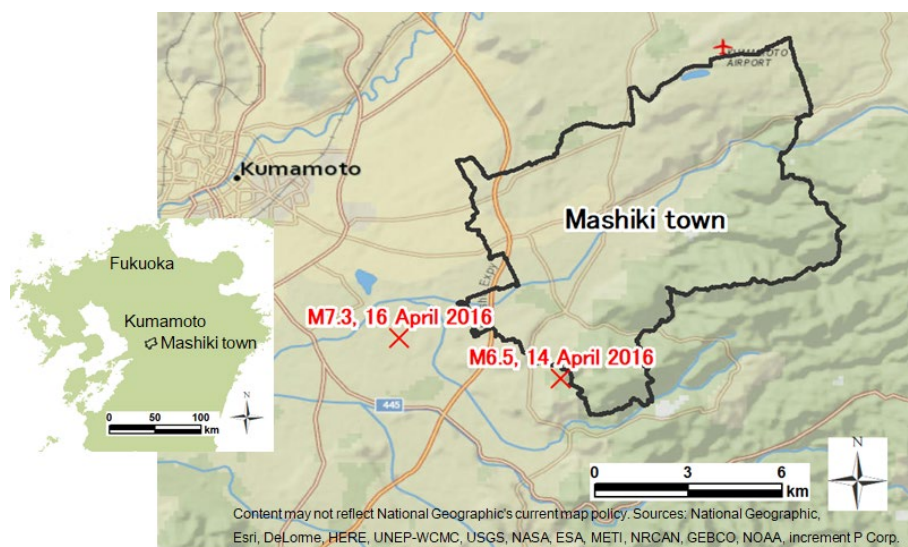


図 1-7 熊本地震の発生場所と益城町の位置関係

1.3.1 自治体の被害建物棟数に基づく災害廃棄物発生量の推計と実績の差

先に述べたように、2016年熊本地震によって、熊本県全体では住家・非住家合わせて約21万棟が被害を受けている。住家に限ると、内閣府災害対策本部^[18]及び熊本県危機管理防災課^[19]が公開している住家被害建物棟数は、地震が発生した約2年後に約19万7千棟と記されている。震源に近い熊本市や益城町では多くの建物が損傷し、解体されることとなった。解体建物は、災害廃棄物として取り扱われ、表1-1に示したように大量の災害廃棄物が発生した。熊本県全体では災害廃棄物処理量（実績）は約300万t^[1]、益城町では約33万7千t^[17]が処理されたと報告されている。円滑な災害廃棄物処理を実施するためには、災害後早い時期に、適切な規模の災害廃棄物発生量を推定し、実施項目やスケジュール等を立てた実施計画を作成することが重要であると述べた。熊本県では、地震発生約1か月半後の2016年6月1日に災害廃棄物処理計画第1版^[20]を公開し、災害廃棄物発生量は195万tと推計した。災害廃棄物処理計画第1版の災害廃棄物発生量（推計）と2018年3月の災害廃棄物処理量（実績）を比較すると1.5倍と大きな乖離があることがわかる。災害廃棄物処理計画第1版の災害廃棄物発生量の推計方法について、熊本県の災害廃棄物処理計画第1版では、被害建物棟数に災害廃棄物量原単位をかけて算出したと書いてあるものの、具体的な災害廃棄物量原単位は記載されていない。試しに、式(1-1)に2018年3月の全壊棟数、半壊棟数と表1-3の東日本大震災の災害廃棄物量原単位（推計）を入力して、災害廃棄物発生量（推計）を計算すると約180万tとなったことから、既存の推計式(1-1)と災害廃棄物量原単位（推計）に近い値で推計されたと考えられる。そのため、熊本地震の場合、既存の災害廃棄物発生量の推計方法では、災害廃棄物処理量（実績）より過少の推計量であったという問題点がある。

熊本県は、地震発生約1年後の2017年5月初めに、災害廃棄物処理計画第2版^[21]を公開した。その時点で、既に提出されている公費解体申請件数が約3万4千件あり、その内解体実施済みである割合が62%であることと災害廃棄物処理量の実績値が157万tであ

第1章 序論

ることから、解体建物棟数と災害廃棄物処理量のそれぞれ実績値に基づいて災害廃棄物量原単位を算出し、提出されている解体申請件数からその後の解体建物数を推定し、災害廃棄物発生量を289万tと見直した。熊本県が公開した災害廃棄物処理計画第1版及び第2版の災害廃棄物量（推計）と災害廃棄物処理事業が完了した時点の災害廃棄物処理量（実績）を図1-8に示す。

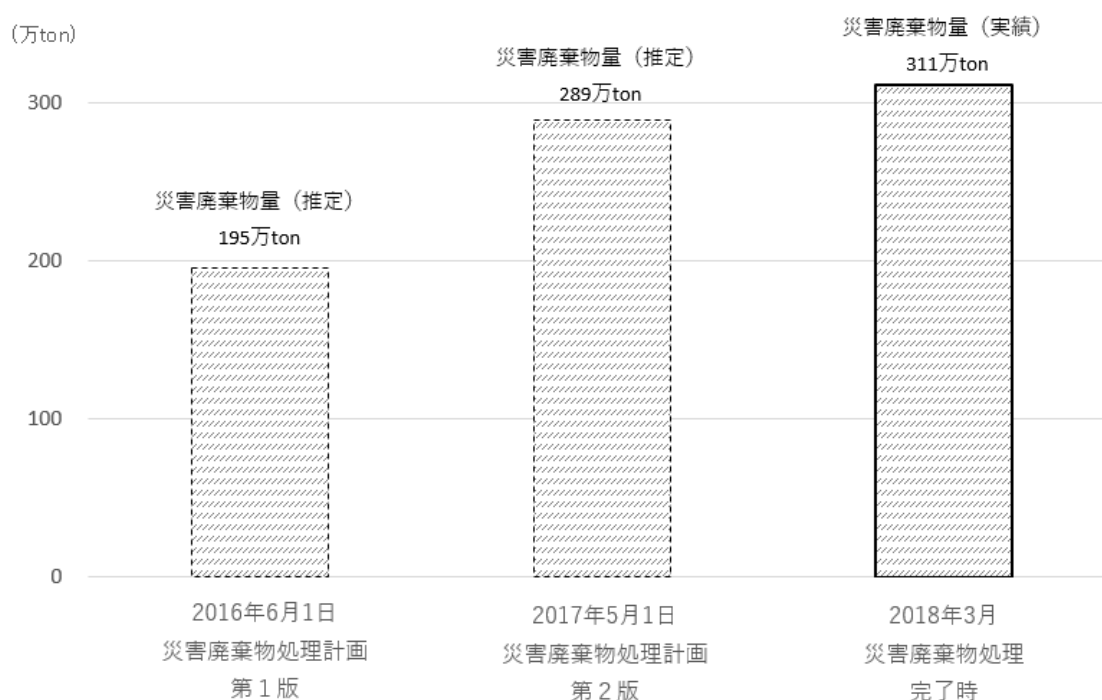


図 1-8 熊本地震後の災害廃棄物処理計画時と処理完了時の災害廃棄物量

災害廃棄物処理計画第2版の災害廃棄物発生量（推計）は、2018年3月の災害廃棄物処理量（実績）に近い値である。災害廃棄物処理計画第2版の災害廃棄物発生量の推計方法は第1版の方法と異なる。第2版では、解体申請の件数とそれまでの解体建物棟数の実績値に基づいて解体建物棟数を予想している。また、解体申請の件数の約半分の解体が進んでいて、その時点までの解体建物棟数（実績）と災害廃棄物処理量（実績）から災害廃棄物量原単位を計算している。解体申請の件数から解体建物棟数を予想し、実績に基づく災害廃棄物量原単位を用いて、災害廃棄物発生量（推計）を計算することによって、推計値が実際の値に近づいたと考える。解体建物に基づく災害廃棄物発生量推計方法で推計精度が向上する可能性があるが、被害建物の内解体された割合や構造内訳等の調査研究は行われてなく、災害廃棄物発生量の推計方法の見直しには至っていない。

1.3.2 被害建物棟数と災害廃棄物処理量の推移

大規模災害では、非常に多く建物が被害を受け、その規模が大きければ概算でも棟数を

第1章 序論

把握するのに時間がかかる。東日本大震災の場合、消防庁が公開している、平成23年東北地方太平洋沖地震とりまとめ報^[22]によると、表1-1に示した全半壊棟数相当と分かるのは、約1年後である。熊本地震の場合でも、内閣府災害対策本部及び熊本県危機管理防災課が公開している住家被害建物棟数の合計は、地震が発生した4月末に約3万7千棟、1か月半後に約11万3千棟、9か月後の12月に約17万9千棟、約2年後に約19万7千棟であり、地震発生直後では被害の全容は分からない。被害建物棟数の規模が分からない状態で、災害廃棄物発生量を推計すると、その推計量はさらに小さく見積もることとなる。事実、熊本県では暫定的に現地調査が完了する前の2016年5月18日に災害廃棄物発生量を推計し、その量は100～130万t^[23]と災害廃棄物処理計画第1版の災害廃棄物発生量（推計）よりさらに少ない値であった。

更に、震源に近い益城町では、町全体の建物が被害を受けていることが予想され、全ての住家建物について現地被害調査が行われた。現地調査による方法は日数を要し、町全体の被害建物棟数の規模が分かるのに、災害後1か月以上かかっている。また、市町村全体の被害の範囲と程度が大きければ、解体建物棟数が多くなり、解体建物棟数の規模の把握できる程度に、実績で解体建物棟数が分かるのは更に年月を要する。解体を余儀なくされる被害建物であっても即時に全て解体されるわけではなく、実際に解体されるまでには、通常、自治体の災害廃棄物処理事業の体制の準備、罹災証明の発行、解体制度の開始、解体申請を経て、実際に解体・処理という流れがあり、事務手続き解体作業の準備等の作業で時間を要するためである。熊本地震発生後の経過年月と益城町の被害建物棟数及び解体建物棟数の時間変化を図1-9に示す。

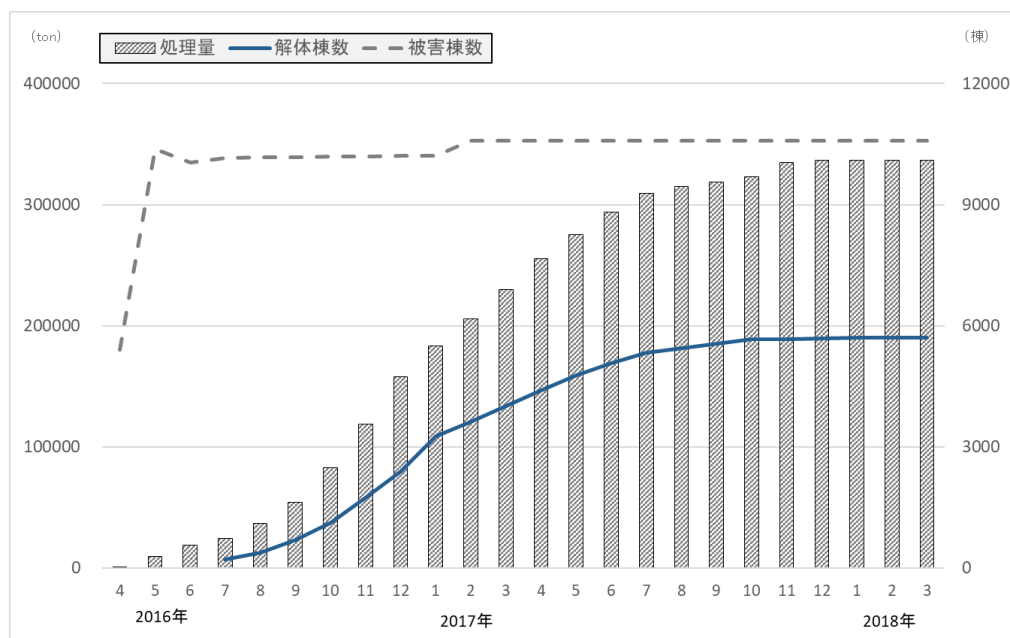


図 1-9 益城町の被害建物棟数、解体建物棟数及び災害廃棄物処理量の時間変化

図 1-9 を見ても分かるように、地震発生後 1、2 か月で災害廃棄物発生量を推計する段

階では、解体建物棟数は極僅かであるため、被害建物の中から解体される建物の割合や構造の内訳はその地震が発生した地域の実績値は使えない。そのため、解体される建物の割合や構造の内訳の調査研究の蓄積がないのは大きな問題といえる。

1.3.3 災害等廃棄物処理事業の財政補助と災害廃棄物量推計の関係

災害廃棄物処理は市町村により実施されるが、当該市町村の財政に対して災害廃棄物処理に要する事業費が大きい場合、その財政負担を軽減するために、災害廃棄物処理事業費の補助制度^[24]がある。環境省は、熊本地震による被害が甚大であることを踏まえて、各市町村が実施する災害廃棄物処理事業が補助対象となることを熊本県等に通知^[25]している。なお、地震災害で災害等廃棄物処理事業の補助対象となるのは、阪神・淡路大震災と東日本大震災に続いて熊本地震が3例目である。災害廃棄物処理事業の補助金額を決めるために、熊本県が各市町村の災害廃棄物量の推計根拠や処理方法等を記載した災害等廃棄物処理事業報告書を提出し、それを受けて、環境省が実地調査を行い査定した。特に、災害廃棄物量が多いと予想された市町村の中で、熊本市は同市内に二次仮置場を設置し、宇土市、御船町、南阿蘇村、益城町、西原村、甲佐町、及び嘉島町の7市町村は単独で処理できないため、熊本県が同7市町村の事務委託を受けて、合同で利用する二次仮置場を設置する計画を立案した。二次仮置場の設計・工事・原状復旧にかかる費用も査定を受けることから、熊本市と同7市町村の災害廃棄物量の推計根拠が非常に重要視される。

1.4 既往の災害廃棄物発生量推計方法における問題点と課題の整理

これまでに述べた既往の災害廃棄物発生量推計方法の問題点と課題について整理する。

1.4.1 既往の災害廃棄物発生量推計方法における問題点

既往の災害廃棄物発生量推計方法と熊本地震の災害廃棄物発生量の推計と実績値の差を確認してきた結果、次の問題点を挙げる。

■問題点1 解体建物に関する調査研究の不足

災害廃棄物は解体建物から排出されるため、災害廃棄物発生量は解体建物棟数や解体建物の構造内訳に相応して増えると予想されるが、解体建物に関する調査研究が不足している。被害建物の中から解体される建物の割合、延床面積、建物構造及び災害廃棄物量原単位等の分析がなされていない。

■問題点2 既往の被害建物棟数に基づく災害廃棄物発生量推計方法

解体建物に関する調査研究が不足しているため、既往の災害廃棄物発生量推計方法は、被害建物棟数に1棟当りの災害廃棄物量原単位（推計）を乗じて推計する方法である。熊本地震の災害廃棄物発生量の推計値と実績値では約1.5倍の違いがあることを述べた。問題点1で挙げたように解体される建物の割合、延床面積、建物構造及び災害廃棄物量

原単位等が分析されていないため、被害建物棟数と解体建物棟数との差によるのか、災害廃棄物量原単位に差があるのか、あるいは他の要因があるのか不確定な要素を含んだ推計方法である。このままでは、今後、起きうる地震で災害廃棄物処理計画を立てる際、解体される建物棟数や構造内訳が分からないままに推計することで差を生じる恐れがある。

1.4.2 本研究の目的と課題

既存の災害廃棄物発生量推計方法によって求めた、2016年熊本地震の災害廃棄物発生量の推計値は、実績値に比べてかなり少ない量であった。被害建物のうち解体される建物の割合、解体建物の構造内訳、延床面積等の解体建物に関する調査研究がなく、被害建物棟数と解体建物棟数との差によるのか他の要因が推計に影響しているのか分析もなされていない状況である。災害廃棄物処理計画第2版で推計した方法のように、災害廃棄物処理事業が予定期間の半分以上が経過し、解体建物棟数（実績）と災害廃棄物処理量（実績）の情報を得られる状況であれば、解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位を算出し、解体申請とその進捗から予想した解体建物棟数を用いて推計した災害廃棄物発生量は、実績値に近くなることも分かった。このことから、解体建物に関する調査や分析を進めることによって、解体建物棟数や災害廃棄物量を推計し、災害廃棄物発生量の推計値と実績値の差を小さくすることも期待できる。そこで、本研究では、解体建物に関する情報を収集するため、被害建物のうち解体建物を特定し、建物構造や延床面積を格納した建物データベースを作成する。作成した建物データベースから、被害建物のうち解体される建物の割合（以下、解体率という）を算出し、被害建物棟数から解体建物棟数を推計する式を提案する。更に、建物データベースから解体建物の構造内訳、並びに自治体単位で処理された災害廃棄物処理量と実際の解体建物棟数から解体建物1棟当りから発生する災害廃棄物量（以下、災害廃棄物量原単位（推計）という）を算出する。

解体率、解体建物の構造内訳と災害廃棄物量原単位（推計）を算出するために、解体建物のデータベースを作成する地域として益城町を選定した。その理由は次の三つである。一つめは、災害等廃棄物処理事業の補助制度は全壊建物からの解体が多いことを想定していることから、熊本地震で全壊建物が最も多い益城町を対象とする。二つ目は、被害判定結果を多く収集する必要があることから、益城町は震度7でほとんどの建物が大小の被害を受けており、被害判定の悉皆調査が行われ、被害の有無を把握できることである。三つめは、本研究で提案する災害廃棄物量の推計式に用いる係数を求めるために、解体建物の構造等について統計的な調査分析を行う必要がある。解体建物の構造内訳については、対象地域の住宅における木造建物の割合によって変わる可能性がある。そのため、分析対象の市町村の木造建物の割合が、全国及び熊本県の平均的な値に近いことが望ましい。住宅・土地統計調査から木造の割合を算出すると、全国平均は約56%、熊本県の各市町村の平均は約65%であり、図1-10に示す益城町の木造建物の割合は約61%と全国及び熊本県平均に近い値である。以上、三つの条件を満たしていることから益城町を分析対象とする。

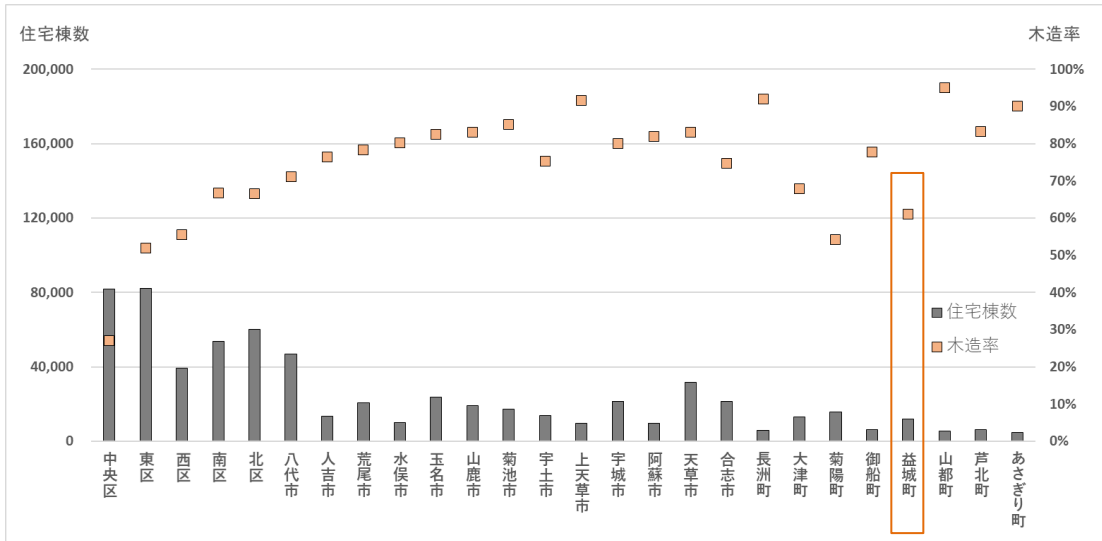


図 1-10 熊本の各市町村の住宅棟数と木造建物の割合

益城町で解体建物の建物データベースを作成し、その分析結果から得られる、解体建物棟数（推定）、解体建物の構造内訳、災害廃棄物量原単位（推計）を用いる災害廃棄物発生量推計式を提案し、災害廃棄物発生量（推計）の精度を改善することを目的とする。

益城町の建物データベース作成と災害廃棄物発生量推計式に用いる係数の調査研究、並びに、その係数の災害廃棄物発生量推計式に適用する関係を図 1-11 に示す。本研究で災害廃棄物発生量推計に関する用語の説明について表 1-4 に示す。

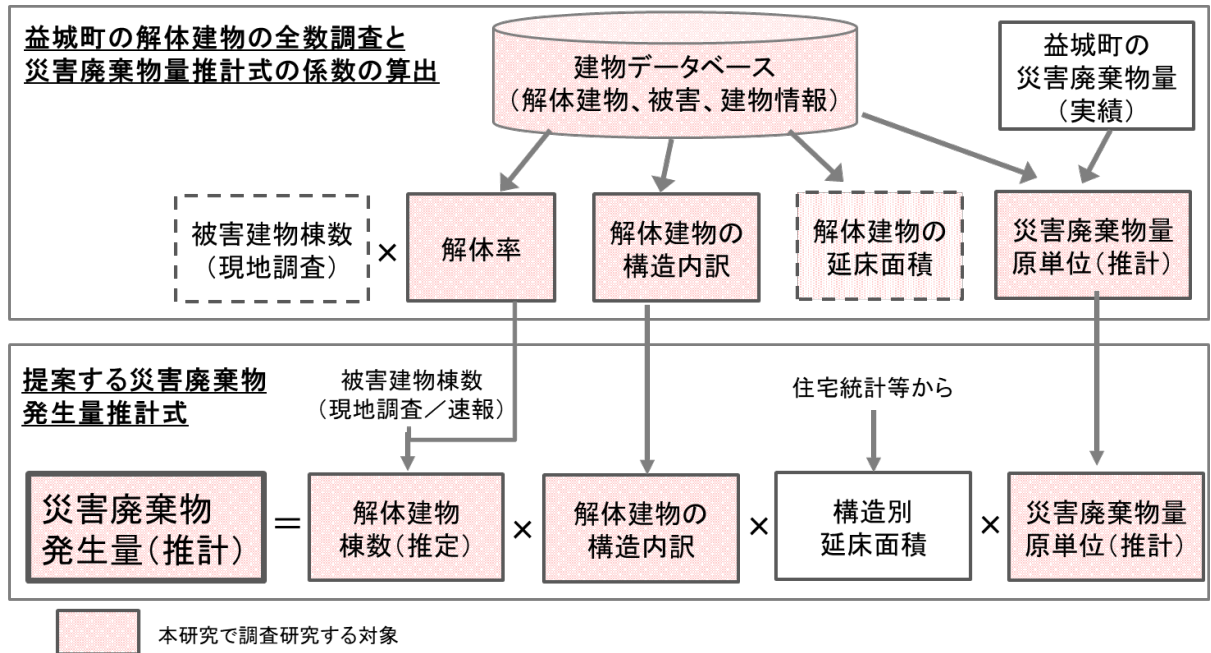


図 1-11 益城町の解体建物の全数調査と災害廃棄物発生量推計式の関係

表 1-4 本研究の災害廃棄物発生量推計に関する用語の説明 (1/2)

	用語	説明
1	被害建物	地震により損壊を受けた建物である。災害に係る住家の被害認定基準運用指針の認定基準 ^[26] に基づいて、自治体が住家等建物被害の程度を全壊、大規模半壊、半壊及び一部損壊の4区分で認定する。
2	自治体の住家被害建物棟数	自治体の現地調査によって被害判定した被害建物の棟数である。2016年熊本地震では、熊本県対策本部及び熊本県危機管理防災課が公表した住家の全壊建物、半壊建物、一部損壊建物の棟数に基づいている。
3	速報の被害建物棟数	国立研究開発法人防災科学技術研究所が「リアルタイム地震被害推定情報」を研究開発した。リアルタイム地震被害推定情報は、地震動から全壊、半壊の被害建物棟数の推計値を格納している。現在は特定非営利活動法人リアルタイム地震・防災情報利用協議会（以下、「REIC」という）がリアルタイム地震被害推定情報を提供している。本研究では、「REIC速報の被害建物棟数」または「速報の被害建物棟数」と表現する。
4	公費解体制度	被害建物のうち、解体を希望する住民に対して、自治体が補助金を活用して復興を支援する制度である。り災証明と一緒に提出される解体申請を自治体が受理し、認定した後、実際に建物が解体されるのが通常の流れである。しかし、住民が自費で建物を解体した後、自費解体の償還申請を受理し、認定する場合もある。
5	解体建物棟数（実績）	住民から提出される解体申請を自治体が認定した後、解体された建物の棟数で、熊本県が集計した結果の棟数である。
6	解体建物棟数（推計）	本研究において、益城町の現地調査による被害認定結果と本研究独自で調査した解体建物の調査結果を使って、全壊、半壊、一部損壊建物の内、解体された割合を求め、自治体の住家被害建物棟数から解体建物棟数を推計する式を作成する。その推計式によって推計した各自治体の解体建物棟数である。
7	解体率	被害建物のうち、解体された建物の割合である。被害判定度合い（全壊、半壊、一部損壊）につき、解体率を求める。

表 1-4 本研究の災害廃棄物発生量推計に関する用語の説明 (2/2)

	用語	説明
8	モデル解体調査	地震によって損壊した建物が解体される際、建物1棟当りの災害廃棄物発生量及び組成等を調査する。熊本地震モデル解体調査では、4棟の木造建物及び3棟のRC構造建物を調査している。
9	災害廃棄物量原単位 (モデル解体)	モデル解体調査によって求められた、延床面積1m ² 当りの災害廃棄物発生量である。
10	建物データベース	本研究独自で、益城町の全建物について、地理情報システム(以下、GIS (Geographic Information System))で扱える建物の輪郭や点の位置情報を素材として、解体建物情報を付加する。益城町の解体建物を全数調査し、解体建物の構造種別、延床面積等の建物情報を格納する。益城町の被害判定結果も付与する。
11	災害廃棄物量原単位 (推計)	本研究独自で作成した、益城町の解体建物の建物データベースから、解体建物の棟数、または延床面積と益城町の実際の災害廃棄物量から導出した、1棟当たりまたは延床面積当りの災害廃棄物量である。
12	災害廃棄物処理量 (実績)	解体された建物から排出され、仮置場及び処分場で処理された災害廃棄物量を自治体が集計した値である。
13	災害廃棄物発生量 (推計)	本研究で調査研究した結果の解体率、解体建物の構造内訳等を用いて災害廃棄物量推計する方法を研究し、その推計方法によって計算した災害廃棄物量の推計値である。
14	災害廃棄物発生量の推計精度	本研究の推計方法による災害廃棄物発生量(推計)と災害廃棄物処理量(実績)と残差を求める。既往の災害廃棄物発生量推計結果による残差より小さくなることを目標とする。
15	住宅・土地統計調査	総務省統計局が5年毎に集計している住宅・土地統計調査である。熊本地震発生時に近い平成30年住宅・土地統計調査を用いる。これは市町村で登録している家屋台帳とは情報源が異なるが、国勢調査を基に統計値が計算されており、住家の延床面積や構造割合等の統計値を参照できる。

図 1-11 の上下の図の順のように、本研究の進め方は、先ず益城町の解体建物を調査し、解体建物の建物データベースを作成して、災害廃棄物発生量推計式に用いる係数を求める。

次に、その係数を災害廃棄物発生量推計式に用いて、熊本地震の益城町以外の自治体の住家被害建物棟数を入力し、災害廃棄物発生量（推計）を計算し、災害廃棄物処理量（実績）と比較することで精度が改善されたか確かめていく。更に、REIC 速報の被害建物棟数を入力する場合の災害廃棄物発生量（推計）を計算し、災害廃棄物発生量（推計）と災害廃棄物処理量（実績）を比較する。本研究では、以下の研究課題に取り組み、大規模災害時の運用を想定して、災害廃棄物発生量推計式に用いる係数の算出とその係数を使った災害廃棄物推計方法を調査研究し、既往の災害廃棄物推計方法よりも推計精度を改善していく。

■研究課題1 全ての解体建物の情報を含む建物データベース作成

益城町の災害廃棄物処理が行われた約2年間に解体された建物を特定する。益城町の全ての解体建物の建物構造や延床面積等の情報を得るために、家屋台帳やGIS等の空間情報との関連付けを行い、建物データベースを作成する。益城町では全ての住家建物を対象にして現地調査による被害認定が行われているため、被害認定結果も解体建物と関連付けし、建物データベースに格納する。これにより、被害建物と解体建物との関係及び解体建物の建物構造の内訳を求める元情報を構築できる。

■研究課題2 解体建物の災害廃棄物量原単位の算出

図1-12のように、益城町の建物データベースから全ての解体建物の建物情報を求め、益城町の全ての解体建物から排出される災害廃棄物の総量を調査することによって、平均の災害廃棄物量原単位を算出する。

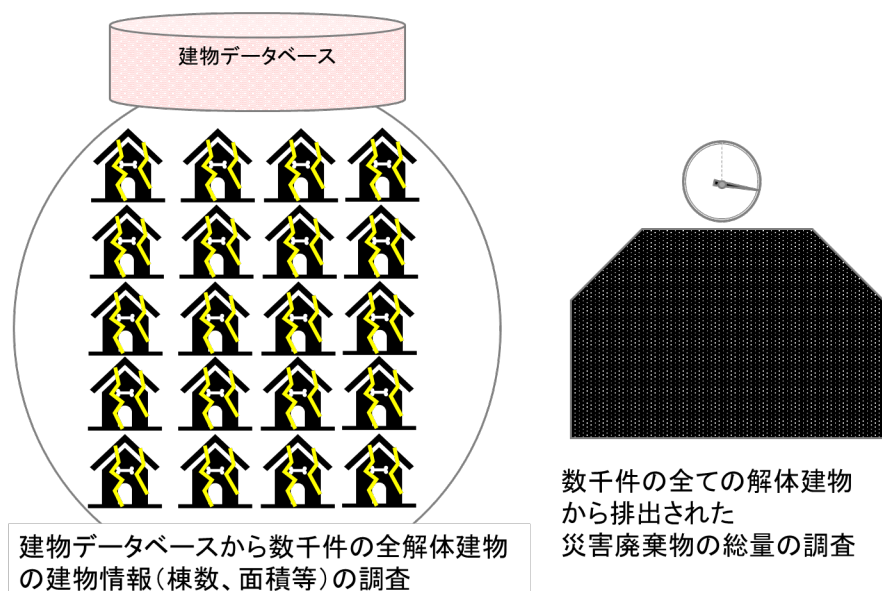


図 1-12 全解体建物の建物情報と災害廃棄物の総量の調査による原単位の算出

■研究課題3 解体率と構造内訳の分析

研究課題1で作成した益城町の建物データベースから解体建物の解体率と構造内訳

を分析する。

■研究課題4 解体率を用いた災害廃棄物発生量推計方法による推計値と実績値の比較と精度の検証

本研究で提案する解体建物に基づく災害廃棄物発生量推計式に、熊本地震の各市町村の住家被害建物棟数を入力し、益城町の建物データベースから導出した解体率、構造内訳、災害廃棄物発生量原単位(推計)を用いて、災害廃棄物発生量(推計)を計算する。既存の災害廃棄物発生量推計式(1-1)による災害廃棄物発生量(推計)も計算し、本研究と既存方法による推計値と災害廃棄物処理量(実績)の残差を求め比較する。また、災害廃棄物発生量の推計の要求精度を設定し、精度検証を行う。

要求精度は、災害廃棄物量の把握時期と仮置場設置された背景から設定する。益城町では災害廃棄物量の規模を把握したのは地震発生の翌月5月であり、暫定で約20万tと試算されたことが記されている^[17]。また、先に述べたように、益城町に加えて、宇土市、御船町、南阿蘇村、益城町、西原村、甲佐町及び嘉島町の7市町村は被害が甚大で市町村単独で災害廃棄物処理を行うことは困難であることから、災害廃棄物約30万tを分別処理可能な二次仮置場を設置する計画を立案し、2016年9月に約10万m²の二次仮置場を開設した。熊本市では同市内に二次仮置場を設置することとしている。このような背景から、本研究の要求精度は、二次仮置場の設置要請のきっかけとなった、20万tを要求精度の目安とする。したがって、本研究では、熊本市、宇土市、御船町、南阿蘇村、益城町、西原村、甲佐町及び嘉島町の8市町村を対象として、住家被害建物棟数を入力し、災害廃棄物発生量の推計値と実測値の残差が既往の推計方法の残差より小さくなること、8市町村の推計値の残差が±20万t以内となることを目的とする。

■研究課題5 速報の被害建物棟数の利用可能性

現地調査によって被害建物棟数の規模を把握するのに1か月以上かかることが想定されるため、より早く入手できる情報を使うことも検討する。平山ら^[27]は、熊本地震の地震動分布と長谷川、翠川ら^[28, 29]の被害関数を用いて被害建物棟数を推計し、地震発生直後に災害廃棄物発生量を推計する方法について研究を行っているが、実績値との差や精度に関する検証までは行っていない。本研究では、初動時に入手できる速報の被害建物棟数を災害廃棄物発生量推計式に入力し、災害廃棄物発生量の推計値の規模を知ること、仮置場設置等の初動に活用できるかを実験する。この実験では、推計精度は定めない。

1.5 本論文の構成

本論文の構成と各章の研究概要を説明する。2章では、研究課題1の益城町で解体された建物について調査を行う。地図や衛星写真等を用いて、益城町の全ての建物の中から熊本地震後解体された建物を特定する。解体建物を特定した後、益城町の家屋台帳及び被害判定結果を入力して、全ての解体建物の建物情報及び被害判定結果を格納した建物データベースを作成する。第3章では、災害廃棄物原単位を求めるための情報収集、整理、解析を行う。益城町の災害廃棄物処理量とその組成別の災害廃棄物量を収集し、第2章で作成した益城町の建物データベースから解体建物の棟数及び延床面積を求め、解体建物1棟当たり及び延床面積当たりの災害廃棄物原単位（推計）を算出する。第4章では、益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析を行う。建物データベースを使って被害建物のうち解体建物の割合を計算できることから、被害判定別に解体率を算出する。損壊した建物の中で解体されない建物や無被害で解体される建物があればその理由についても調査する。建物データベースに格納した構造種別を使って、解体建物の構造内訳を計算する。第5章では、第3章で求めた益城町の災害廃棄物原単位、被害別の解体率及び建物構造内訳を係数として用いて、災害廃棄物推計式に熊本地震の各市町村の住家被害建物棟数を入力して災害廃棄物発生量を推計する。既存の推計式(1-1)で計算した災害廃棄物発生量(推計)と比較して、災害廃棄物処理量(実績)に近い値となるか、並びに各自治体の推計値の残差が±20万t以内となるかを確認する。また、地震後の被害速報を災害廃棄物発生量推計方法に利用できる可能性があるか確認するため、REIC速報の被害建物棟数を用いて、災害廃棄物発生量を推計し、災害廃棄物処理量(実績)との差異確認を行う。図1-13に本論文の構成と進め方を示す。また、表1-5に問題点、研究課題と章の対応を示す。

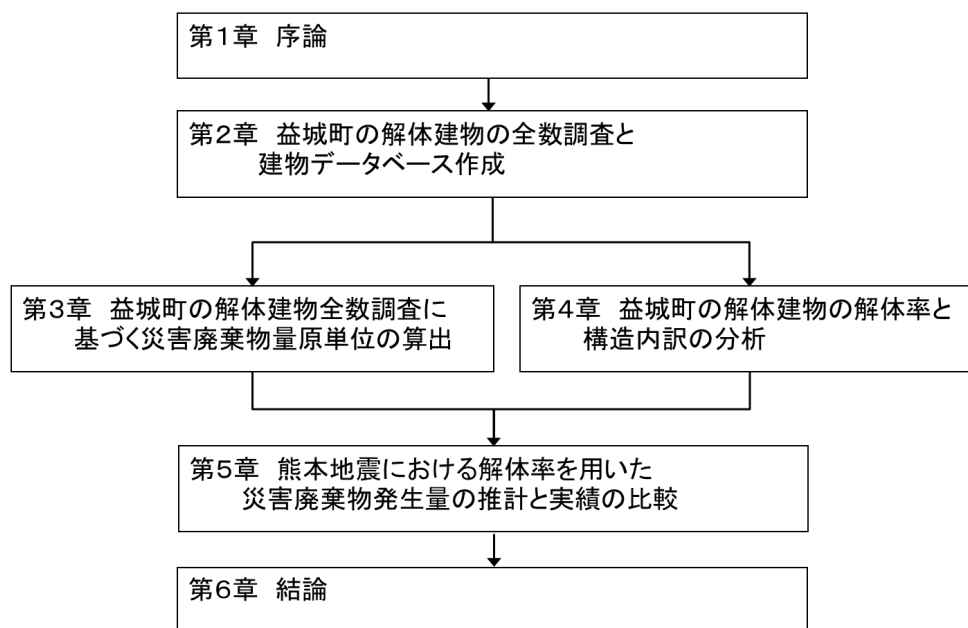


図 1-13 論文の構成と進め方

表 1-5 問題点、研究課題と章の対応

問題点	研究課題	章
■問題点 1 解体建物に関する調査 研究の不足 (1.2 既往の災害廃棄物発生量の調査と推計方法、 1.3.1 自治体の被害建物棟数に基づく災害廃棄物発生量の推計と実績の差より)	■研究課題 1 全ての解体建物の情報を含む建物データベース作成	第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成
	■研究課題 2 解体建物の災害廃棄物量原単位の算出	第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出
	■研究課題 3 解体率と構造内訳の分析	第4章 益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析
■問題点 2 既往の被害建物棟数に基づく災害廃棄物発生量推計方法 (1.3.1 自治体の被害建物棟数に基づく災害廃棄物量の推計と実績の差、 1.3.2 被害建物棟数と災害廃棄物処理量の推移より)	■研究課題 4 解体率を用いた災害廃棄物発生量推計方法による推計値と実績値の比較と精度の検証	第5章 熊本地震における解体率を用いた災害廃棄物発生量の推計と実績の比較 5.4 自治体の被害調査に基づく災害廃棄物発生量の推計と実績の比較
	■研究課題 5 速報の被害建物棟数の利用可能性	5.5 地震後被害速報を利用した災害廃棄物発生量推計の実験

1.6 序論のまとめ

大規模災害後、迅速な復旧・復興のためには、災害廃棄物の処理をスムーズに進めることが大切であり、災害廃棄物処理計画を立案するために、推計発生量を適切に推定することが重要であることを述べた。既往の災害廃棄物発生量推計式は、被害建物棟数に基づいて災害廃棄物発生量を推計している。2016年熊本地震の1か月半後、災害廃棄物処理計画策定時の災害廃棄物発生量（推計）に対して、2年後処理事業完了時の災害廃棄物処理量（実績）は1.5倍であった。既往の災害廃棄物発生量推計式では、推計と実績の差が被害建物棟数と実際の解体建物棟数との差に因るのか、解体建物の構造内訳、災害廃棄物量原単位等に因るのか問題が不明確である。そこで、本研究は、益城町で建物データベースを作成し、解体率、解体建物の構造内訳、災害廃棄物量原単位（推計）を分析すること及び分析結果を用いた災害廃棄物発生量を推計する方法を提案し、精度向上することを目的とした。本研究を進める過程で達成する研究課題と災害廃棄物量の推計に関する要求精度を設定し、論文構成を示した。

参考文献(第1章)

- [1] 環境省 環境再生・資源循環局災害廃棄物対策室：近年の自然災害における災害廃棄物対策について, 2021.
https://www.env.go.jp/recycle/r2_3_saigai_kento_shiryo01-1.pdf
(参照 2021 年 2 月 6 日)
- [2] 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：災害廃棄物対策指針(本編), 2018.
http://kouikishori.env.go.jp/guidance/guideline/pdf/position_of_pointer_main.pdf
(参照 2021 年 2 月 6 日)
- [3] 国立環境研究所：放射能汚染廃棄物以外の災害廃棄物に関する研究概要報告, 2013.
https://www.nies.go.jp/fukushima/pdf/hokoku_gaiyosaigai.pdf (参照 2021 年 2 月 6 日)
- [4] 多島良, 平山修久, 高田光康, 宗清生, 大迫政浩：マネジメントからみた災害廃棄物発生量推計手法の現状と展望, 廃棄物資源循環学会論文誌, 第 29 巻, pp. 104 - 118, 2018.
- [5] 平山修久, 大迫政浩：東日本大震災の経験からみた災害廃棄物処理計画とそのマネジメントのあり方, 都市清掃, 第 67 巻, 第 318 号, pp. 69-75, 2014.
- [6] 災害廃棄物分別・処理 実務マニュアル—東日本大震災を踏まえて— 一般社団法人廃棄物資源循環学会, 2012.
- [7] 高月紘, 酒井伸一, 水谷聡：災害と廃棄物性状——災害廃棄物の発生原単位と一般廃棄物組成の変化——, 廃棄物学会誌, 第 6 巻, 第 5 号, pp. 351 - 359, 1995.
- [8] 橋本征二, 寺島泰：建築物解体廃棄物の原単位設定, 廃棄物学会論文誌, 第 10 巻, 第 1 号, pp. 35 -44, 1999.
- [9] 環境再生・資源循環局災害廃棄物対策室：平成 29 年度災害廃棄物対策推進検討会第 2 回資料 1 - 1 (別添) 災害廃棄物発生量の推計精度向上のための方策検討, 2018.
http://kouikishori.env.go.jp/action/investigative_commission/h29_fiscal_year/pdf/document_h3006_03.pdf (参照 2021 年 2 月 6 日)
- [10] Hirayama, N., Shimaoka, T., Fujiwara, T., Okayama, T., Kawata Y.: Establishment of disaster debris management based on quantitative estimation using natural hazard maps, Waste management and Environment V, Vol. 140, pp.167-178, 2010.
- [11] 平山修久, 大迫政浩：東日本大震災の経験を踏まえた災害廃棄物の発生量原単位の推定, 環境衛生工学研究, 第 28 巻, 第 3 号, pp.139-142, 2014.
- [12] 総務省：平成 30 年住宅・土地統計調査 住宅及び世帯に関する基本集計, 2018.
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search?page=1&toukei=00200522> (参照 2021 年 2 月 6 日)
- [13] 牧紀男, 堀江啓：阪神・淡路大震災の公費解体と災害廃棄物—— どのような物理的被害の建物が解体されたのか——, 日本建築学会計画系論文集, 第 81 巻, 第 730 号, pp. 2723- 2729, 2016.
- [14] 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：災害廃棄物対策指針【技 14-2】災害廃棄物等の要処理量の推計方法, 2020.

http://kouikishori.env.go.jp/guidance/download/pdf/pdf_all_2020.zip

(参照 2021 年 2 月 6 日)

[15] 環境省：巨大災害時における災害廃棄物対策のグランドデザインについて

http://kouikishori.env.go.jp/action/investigative_commission/grand_design/pdf/h2603_report.pdf (参照 2021 年 2 月 6 日)

[16] 熊本県：平成 28 年熊本地震における災害廃棄物処理の記録, 2019.

<https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/20788.pdf> (参照 2021 年 2 月 6 日)

[17] 熊本県益城町：平成 28 年熊本地震による益城町災害廃棄物処理事業記録, 2018.

<https://www.town.mashiki.lg.jp/kiji0032321/index.html> (参照 2021 年 2 月 6 日)

[18] 内閣府：防災情報のページ-熊本県熊本地方を震源とする地震に係る被害状況等について.

<http://www.bousai.go.jp/updates/h280414jishin/>(参照 2021 年 9 月 23 日)

[19] 熊本県危機管理防災課：平成 28 年熊本地震に関する災害対策本部会議資料.

<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/4/51503.html>(参照 2021 年 9 月 23 日)

[20] 熊本県：熊本県災害廃棄物処理実行計画～ 第 1 版 ～, 2016.

<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/53/2345.html> (参照 2021 年 2 月 6 日)

[21] 熊本県：熊本県災害廃棄物処理実行計画～ 第 2 版 ～, 2017.

<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/53/2361.html> (参照 2021 年 2 月 6 日)

[22] 総務省消防庁：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震とりまとめ報.

<https://www.fdma.go.jp/disaster/higashinihon/higaihou-past-jishin> (参照 2021 年 9 月 23 日)

[23] 熊本県：平成 28 年熊本地震 災害廃棄物処理の基本方針（平成 28 年 5 月 18 日付）.

<https://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/4/51503.html> (参照 2021 年 2 月 6 日)

[24] 環境省：災害等廃棄物処理事業費補助金の概要.

http://kouikishori.env.go.jp/action/auxiliary_scheme/(参照 2022 年 2 月 4 日)

[25] 環境省：平成 28 年熊本地震に係る災害廃棄物処理事業の補助対象拡充について（周知）, 2016 年 5 月.

http://kouikishori.env.go.jp/archive/h28_shinsai/pdf/h28_shinsai_info_160503_01.pdf (参照 2022 年 2 月 4 日)

[26] 内閣府：災害に係る住家の被害認定基準運用指針, 2021.

<http://www.bousai.go.jp/taisaku/unyou.html> (参照 2021 年 9 月 22 日)

[27] 平山修久, 大迫政浩, 林春男：災害初動期における災害廃棄物量の把握システムの構築－2016 年熊本地震でのケーススタディによる－, 地域安全学会論文集, 第 30 号, pp.111-117, 2017.

[28] 長谷川浩一, 翠川三郎：地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測－その 1 建築年代別の木造建築物棟数の推定－, 日本建築学会構造系論文集, 第

第1章 序論

497号, pp.75-80, 1997.

[29] 長谷川浩一, 翠川三郎: 地域メッシュ統計を利用した広域での非木造建築物群の震害予測, 日本建築学会構造系論文集, 第521号, pp.41-47, 1999.

第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

2.1 はじめに

熊本地震後の2016年4月から2018年3月までの間に、益城町で災害廃棄物処理事業が行われ、約5700棟の建物が解体されている。全壊建物及び半壊建物から解体される建物の割合、並びに解体建物1棟から発生する災害廃棄物量を知るために、益城町の解体建物を全数調査し、被害判定結果と関連付け、延床面積及び建物構造等の建物情報とも関連付けした建物データベースを作成することが目的である。図2-1に第2章の調査対象研究を示す。

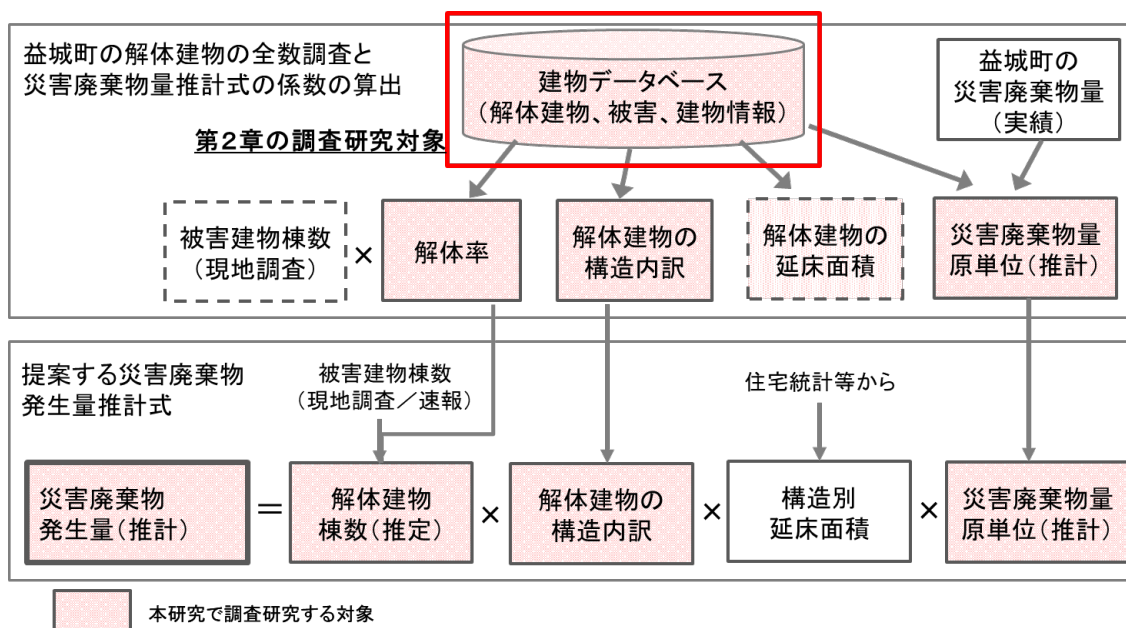


図 2-1 第2章の調査研究対象

益城町の解体建物の全数調査と建物データベースを作成するため、素材となる益城町の多くの建物の位置情報を持つ地図データを調査する。益城町の記録によると、住家と非住家を含めて、益城町全体で約16,000棟^[1]の建物があることから、地震前の建物位置を特定することが不可欠であるため、GISで建物部分のみを抽出する。これを建物データベースの元情報とする。益城町の全ての建物について、建物データベースの建物位置と熊本地震後に撮影された衛星画像を見ながら、解体建物か現存建物か識別し、その情報を建物データベースに追加する。現地調査によって被害判定された結果及び家屋台帳の建物情報の位置情報と建物データベースの建物位置によって関連付けを行い、目的とする建物データベースを作成する。

2.2項以降、建物データベースの作成の具体的な手法を説明する。

2.2 地図データと衛星画像を使った解体建物の識別と建物データベース作成

益城町全体で約 16,000 棟の建物があるため、衛星画像を目視判読してラベルを付けるだけでも、非常に手間と時間がかかる。時間を短縮して解体・現存建物のラベル付けを行うために、GIS で地震前から在る建物位置を表示し、その位置の衛星画像を解析し、解体建物を識別しやすい補助的指標を作成することを検討する。航空写真や WorldView や Pleiades 等の 1m より高分解能の光学衛星画像を使用して、建物抽出や建物輪郭の抽出に関連する既存の研究^[2-8]は非常に多い。建物等の検出手法の研究を促進するコンペティション等も行われている。2018 年に開催された CVPR DeepGlobe Satellite^[9]では、Hamaguchi and Hikosaka^[10]が畳み込みニューラルネットワークを改良して、サイズの異なる建物の検出性能を上げる成果を示した。しかし、このような画像解析手法は、数千の建物の教師データを必要とする。益城町の解体建物と現存建物を識別した数千の教師データを作る場合、非常に時間がかかる。そこで、以下の方針をもって、解析手法を検討することとした。

- ・教師データ作成に要する時間は少なくする。
- ・最終的には、全て目視判読によって解体建物の識別を行うが、判読を補助する指標を画像解析により作成する。
- ・判読を補助する指標は建物 1 棟毎に付与し視覚化する。

益城町の解体建物を全数調査し、建物データベースを作成するまでのフローを図 2-2 に示す。公開されている地図等から建物の輪郭情報の取得と整形、衛星画像の幾何補正、教師データ作成、解体建物を識別する画像解析指標作成、解体建物と現存建物の目視判読を行う。地震発生後から災害廃棄物処理完了までに複数回撮影した衛星画像があり、判読しにくい撮影条件の画像があっても複数時期の撮影画像で確認することにより益城町の解体建物の全数調査を行う。益城町の全ての建物に、解体か現存か識別をして、建物データベースの骨格を作成する。建物データベースの骨格を作成するまでの方法を 2.2 項に示す。図 2-2 の (2) 建物データベースに被害判定の関係付けについては 2.3 項に、(3) 被害判定調査時の撮影写真による建物情報の調査及び (4) Google Earth による建物情報の調査については 2.4 項に、その方法を述べる。

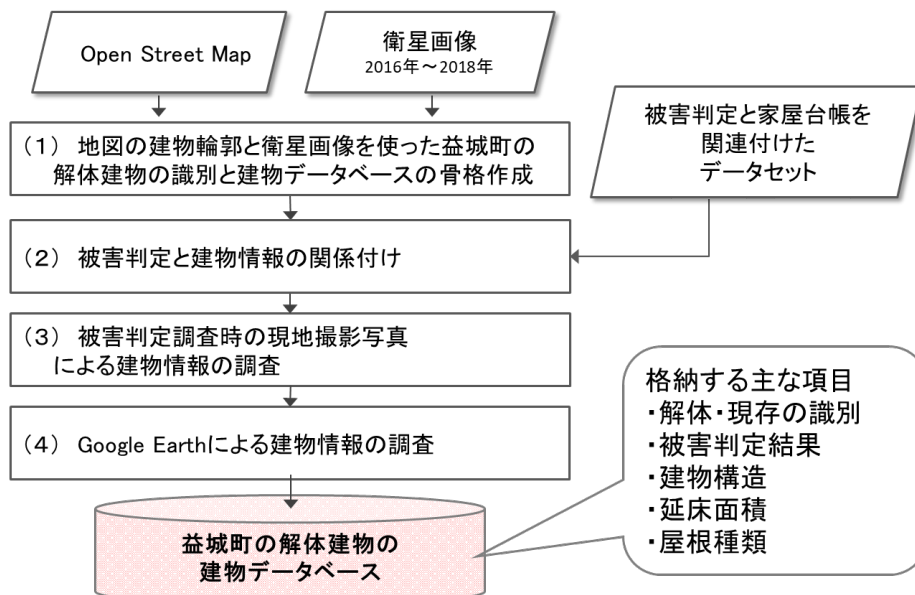
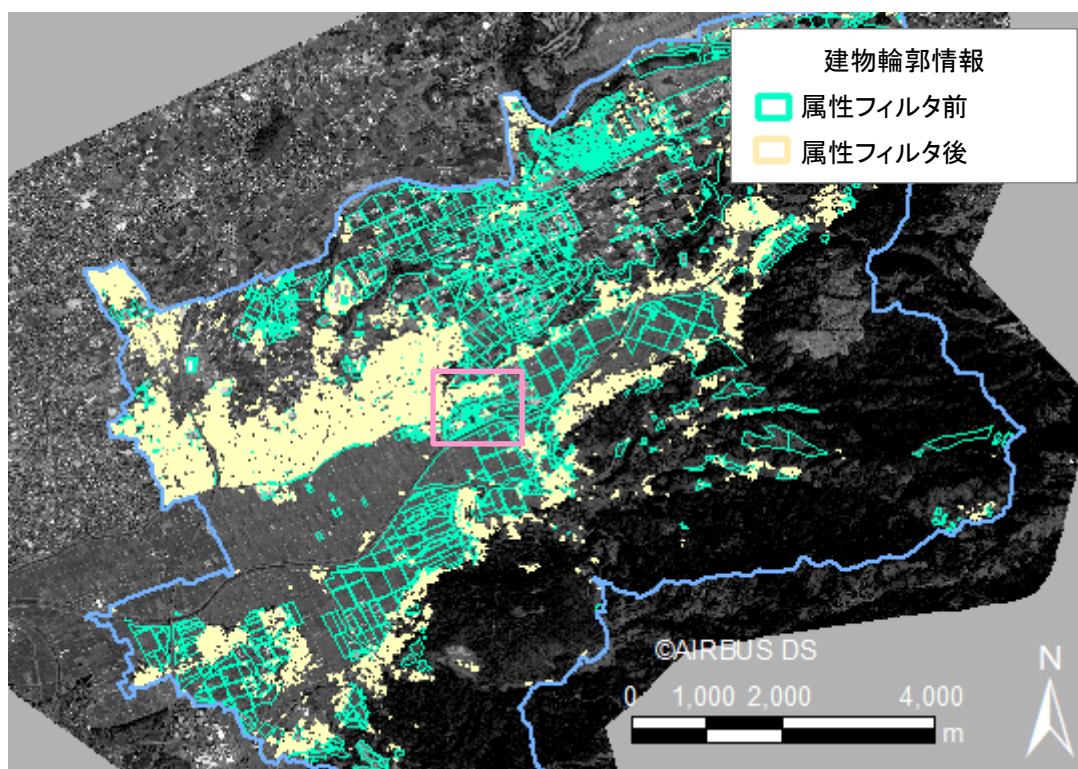


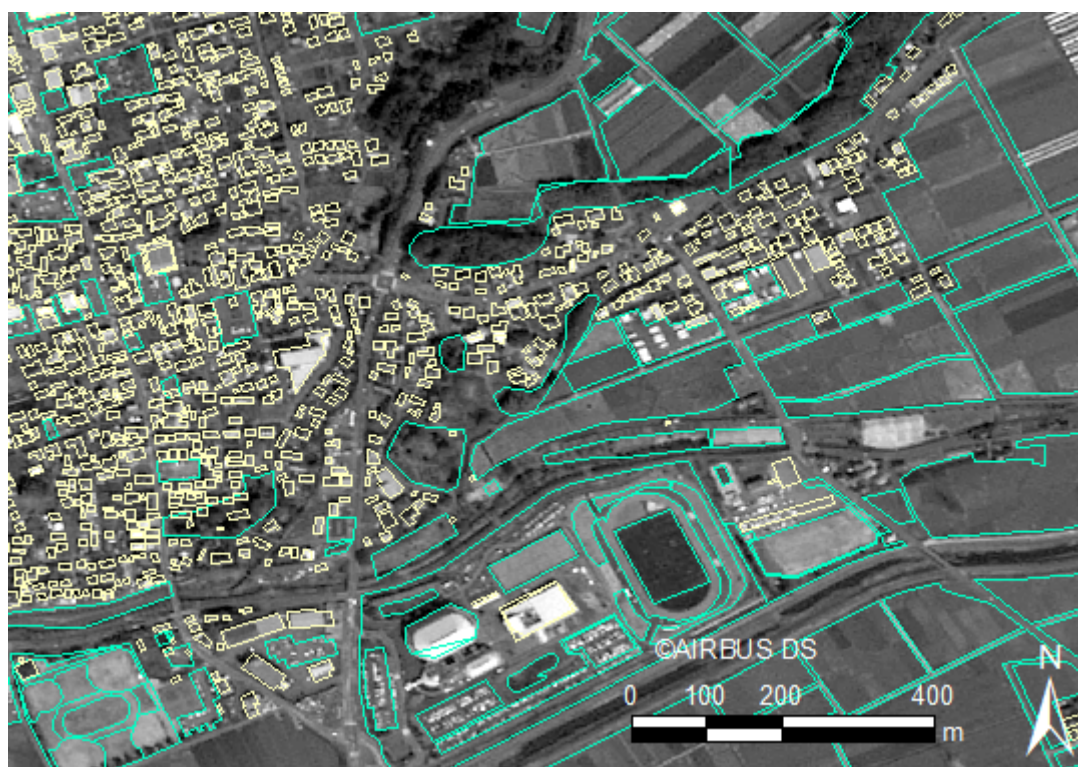
図 2-2 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成フロー

2.2.1 建物データベースに使用する GIS データ

解体建物を衛星画像により画像解析と目視判読し、建物 1 棟毎に解体か現存か識別するために、地震発生前の益城町の 1 棟単位の建物輪郭情報を含む地図データを収集し、GIS で抽出したデータを建物データベースの素材として用いる。益城町の建物の輪郭情報をより多く含んでいる地図データを収集するために、公開されている地図データを調査した。国土地理院の基盤地図^[11]、Google Earth^[12]及び Open Street Map^[13]（以下、OSM という）データに含まれる建物の多さについて益城町付近を表示して目視で確認した。OSM の建物輪郭情報が最も多い様子であったため、益城町全体を含む範囲の OSM データをダウンロードした。益城町の範囲内の OSM データには、17,190 件の輪郭情報データがあったが、その中には建物以外の田畑等の輪郭情報もあった。輪郭情報に対する属性が Green house, Farm であるものや属性がついていないものは削除し、Apartments, House, Residential, Other buildings の属性が付いている輪郭情報のみを絞り込んだ。属性フィルタで絞り込んだ建物の件数は 15,794 件となった。属性フィルタ適用前後の輪郭情報を図 2-3 (a)、(b) に示す。建物に関する属性で絞り込みした OSM データが益城町の全ての建物を含んでいるか確認していった。平成 30 年住宅・土地統計調査^[14]によると、益城町の住家総数は 10,700 棟である。益城町には住家以外の建物が存在していて、益城町の記録では、町内の当時の家屋等総数が 15,304 棟であると報告されている。属性で絞り込みした OSM データの 15,794 件あるので、これら統計の家屋棟数を上回っている。しかし、地震発生時には、OSM データの地図に記録されていないケースも考えられるため、OSM データの建物の輪郭情報と地震前の衛星画像を目視で判読すると、OSM データに記録されていない建物があることに気づいた。OSM データに記録されていない建物が 312 棟あることを確認し、図 2-4 にその建物を紫色で示す。

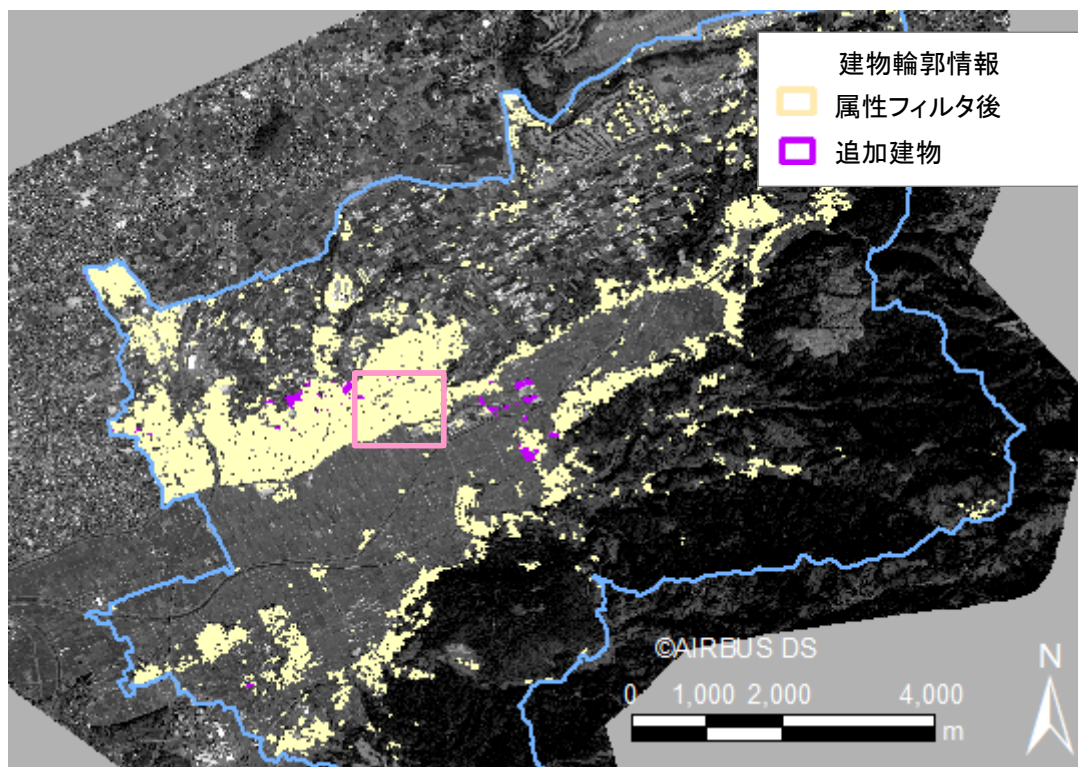


(a)

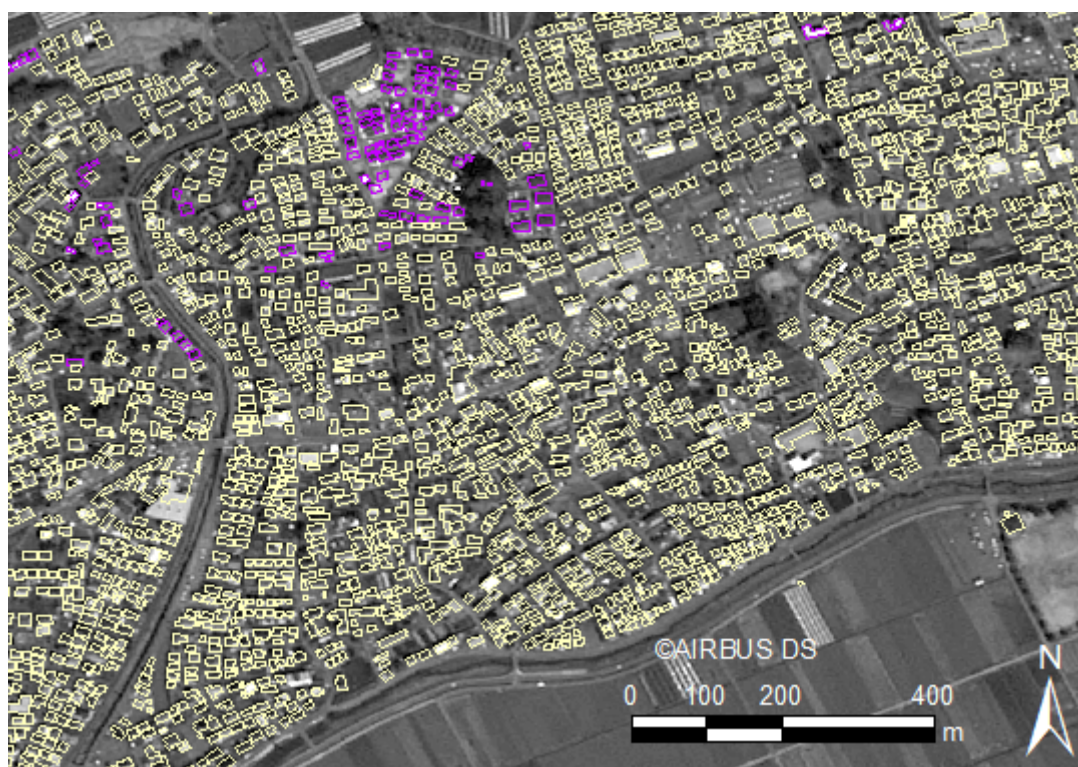


(b)

図 2-3 OSM から取得した輪郭情報と属性フィルタの適用
(a) 益城町全体 (2016年 3月 20日撮影 SPOT 画像背景); (b) 枠線内拡大.



(a)



(b)

図 2-4 OSM に記録されていない建物の追加

(a) 益城町全体 (2016年 3月 20日撮影 SPOT 画像背景); (b) 枠線内拡大.

以上により、16,106 棟の建物の輪郭情報を持つ GIS データを生成することができ、益城町の全ての建物を包含していると考えられる。これを建物データベースの素材情報とし、以降の研究で情報を追加していく。なお、建物の棟数にそれぞれ違いがあるため、益城町において、作成した建物データベースの棟数、OSM データの建物数、実際の解体建物数、住宅・土地統計調査の住宅の建物数の関係を図 2-5 に示す。

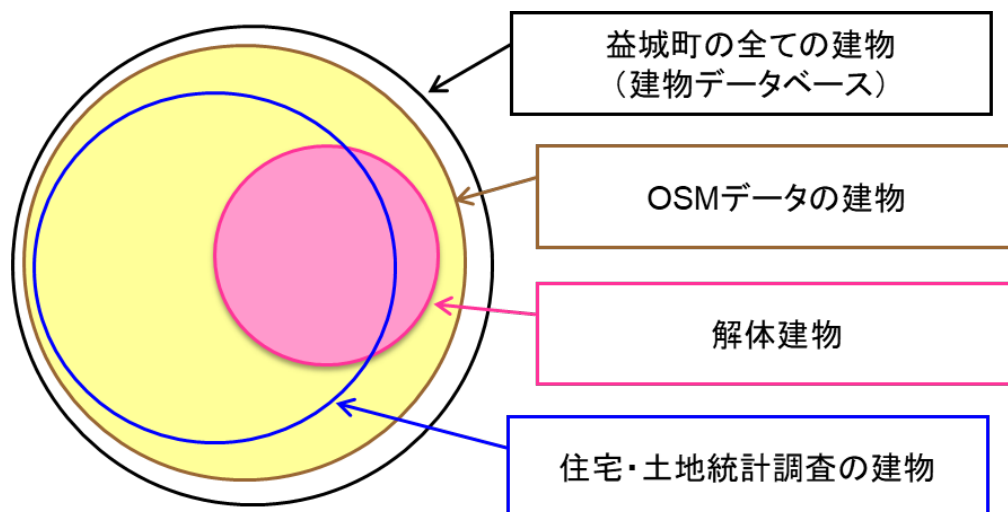


図 2-5 益城町の全ての建物と解体建物と OSM データの建物の包含関係

2.2.2 解体建物の全数調査に使用する衛星データ

熊本地震後の 2016 年 4 月から益城町の災害廃棄物処理完了時 2018 年 3 月の約 2 年間に解体された建物を識別するために、複数回撮影した衛星データを適切に選定する。

2018 年 3 月までの間に益城町を雲がかかっている状態で撮影している高解像度の衛星画像を検索した。SPOT 衛星画像は 1.5m 解像度があり、かつ比較的撮影回数が多かったため、画像を選定することとした。地震発生 1 か月前の 2016 年 3 月 20 日、災害廃棄物処理実施計画が発表されてから約 2 か月後の 2016 年 7 月 29 日、さらに約半年後の 2017 年 1 月 1 日、災害廃棄物処理事業がほぼ完了した 2018 年 3 月 25 日に撮影した画像を選定した。また、2017 年 7 月 29 日の画像は約 0.3km² とわずかであるが雲で覆われている箇所があったため、撮影日が近い画像データで補間する目的で、2016 年 8 月 11 日の画像も選定した。1m より高解像度の衛星 Pleiades や World View-2 等も存在するが、熊本地震発生後 2 年間では撮影回数が少なかった。2017 年 1 月 1 日に撮影した Pleiades 画像があり、これは SPOT 画像と同一撮影日であり、目視判読するだけでなく、分解能が異なる画像の見え方の違いを理解するのに役立った。また、災害廃棄物処理事業完了後の状態を確認するために、同年の 2018 年 10 月 13 日に撮影された Pleiades 画像も選定した。選定した撮影日、衛星名及び解像度を表 2-1 に示す。

表 2-1 解体建物の調査に使用した衛星画像一覧

撮影日	衛星名	解像度	観測角度(deg.)	
			Along Track	Cross Track
2016年3月20日	SPOT-7	1.5m	-15.3	-10.4
2016年7月29日	SPOT-6	1.5m	14.4	-0.3
2016年8月11日	SPOT-7	1.5m	-18.2	7.0
2017年1月1日	SPOT-6	1.5m	2.8	0.8
2017年1月1日	Pleiades-1B	0.5m	7.4	11.6
2018年3月25日	SPOT-7	1.5m	20.5	-11.4
2018年10月13日	Pleiades-1B	0.5m	13.5	6.5

表 2-1 に示した衛星画像を益城町の GIS データを重ね合わせたところ、位置ずれがあった。益城町は一定の高さの標高があり、山間地域もあるため、地形による位置ずれと予想される。画像解析ソフトウェア ENVI を使って、衛星画像とそれに付属している幾何補正用データと国土地理院の標高モデル^[15]を入力データとして、地形による歪みの補正を行った。GPS で位置を計測し、地形の歪み補正済み画像上での位置が 3m 以内(衛星画像の 2 画素以内)の水平精度となっていることを確認した。また、位置計測場所から現地を見て堅牢で輪郭が明確なビルを目視確認し、写真撮影した。GPS 位置、被写体のビルの位置、周辺の建物の輪郭などを GIS で描画し、画像上の建物位置と OSM データの建物輪郭が重なっていることを確認した。図 2-6 に、GIS で重ね合わせた OSM データと衛星画像と現地で撮影したビルの写真を示す。

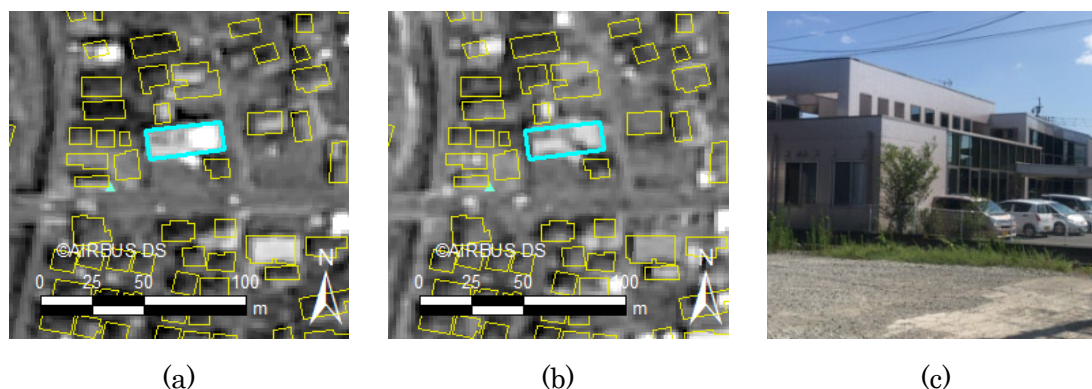


図 2-6 補正済み衛星画像の位置と OSM データ建物輪郭位置の確認

(a)2016年3月20日撮影；(b)2018年3月25日撮影；(c)著者現地撮影写真.

2.2.3 解体建物付近の画像の特徴と画像解析指標の作成

解体建物と現存建物の判別を効率的に行うために、衛星画像上で解体建物と現存建物の写っている部分の画像の変化の特徴を把握する必要がある。そこで、現地調査を行い、解体建物と現存建物の調査を行うこととした。現地調査を行ったのは2018年3月の災害廃棄物処理事業完了後であり、現地調査前に、衛星画像を俯瞰的に眺めて、建物が多く解体されている地域を絞込みしておき、現地の状態を目視で確認して、建物が解体された跡地か建物が残っているかを調査した。図2-7(a)から(d)に、現地調査で撮影した現存建物と解体建物の跡地の写真を示す。これらの写真が撮影された位置と方向は図2-8の矢印位置と方向に対応している。



図 2-7 現存建物と解体建物の跡地の現地撮影写真

(a) 現存建物； (b) 現存建物； (c) 解体跡地； (d) 解体跡地。

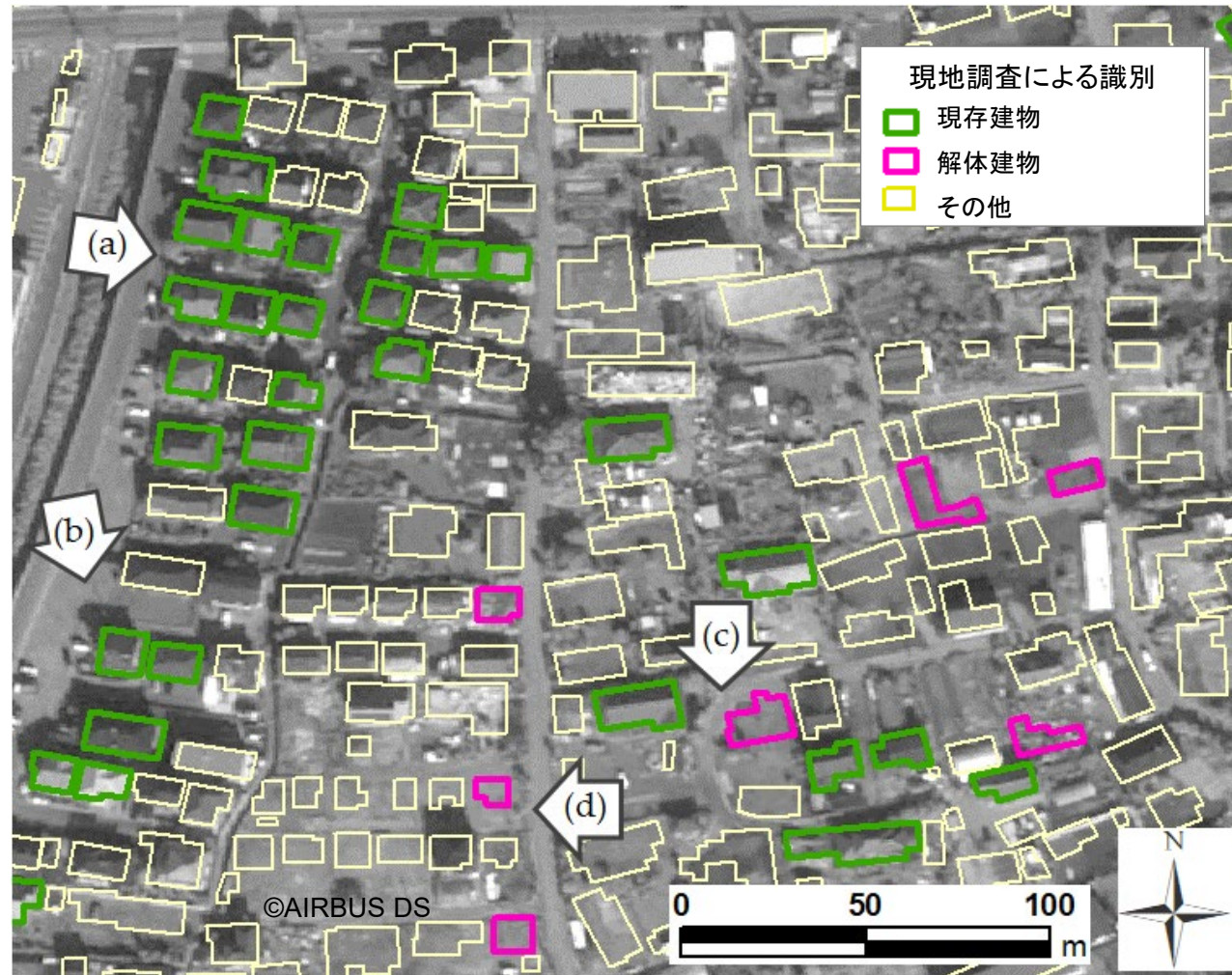
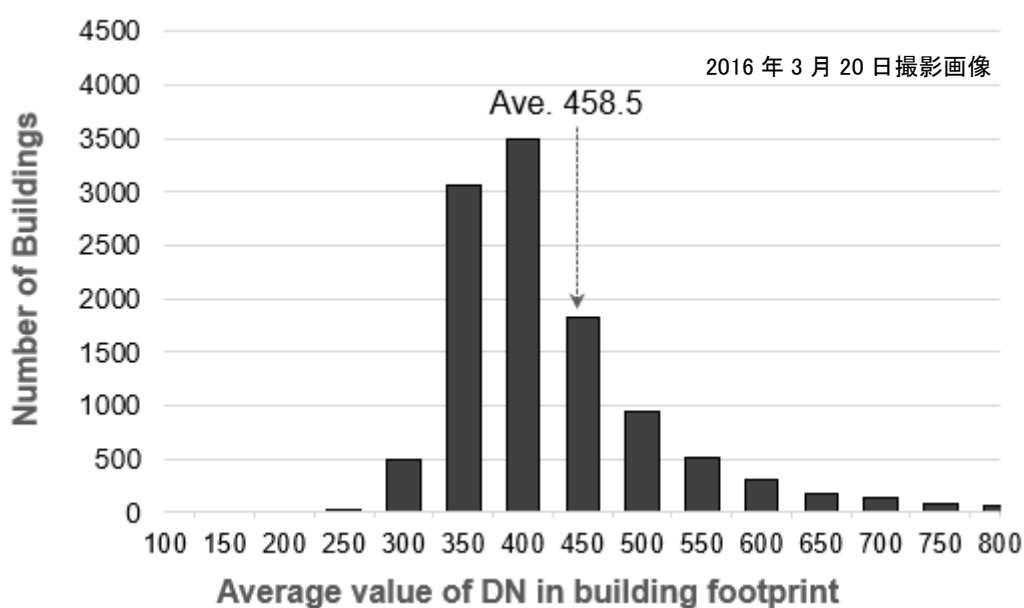


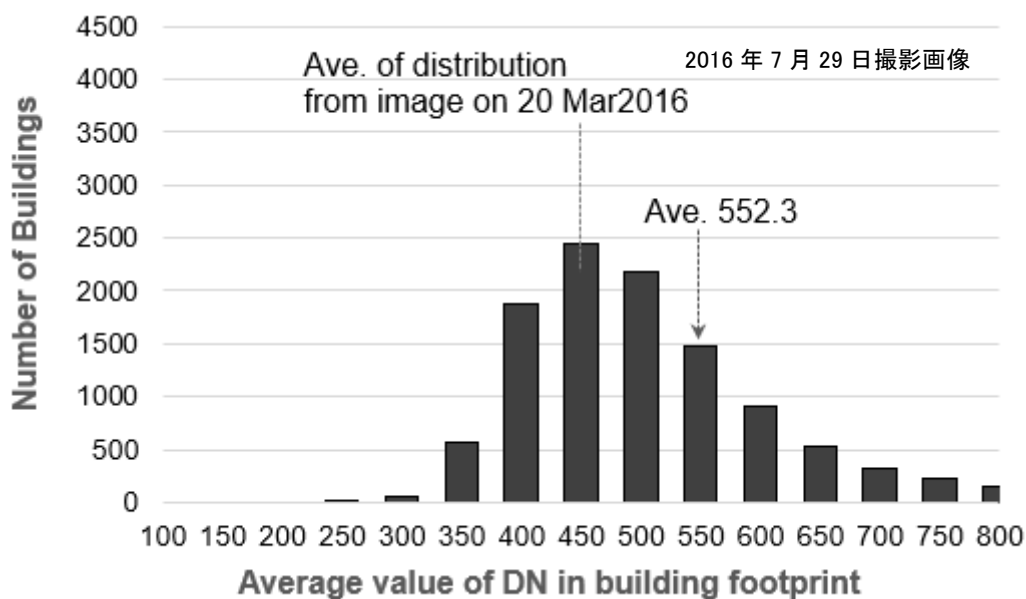
図 2-8 現地調査に基づく解体建物確認場所
(図 2-7 (a) から (d) の写真撮影位置と方向を矢印で示す)

第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

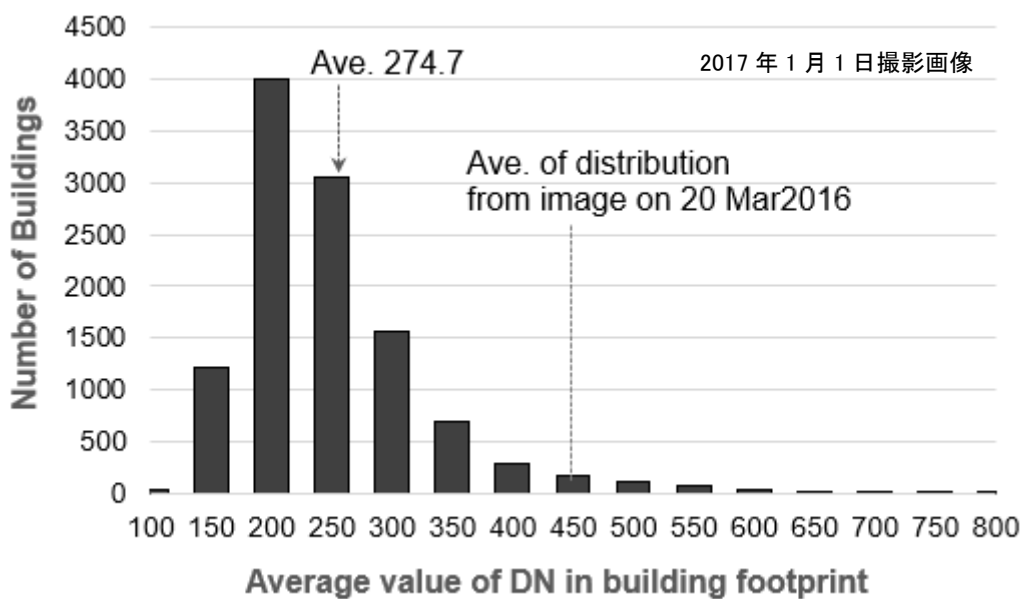
表 2-1 に示した SPOT 画像は、同じ解像度で複数回撮影している。地震前に 2016 年 3 月 20 日と地震後に 3 回の 2016 年 7 月 29 日、2017 年 1 月 1 日、2018 年 3 月 25 日に撮影した画像がある。画像の撮影時期が違ると、太陽光の照射強度、地表面からの反射、植生の活性具合により画像の明るさ（画素値）が変化することはよく知られている。建物の解体前後の画像の変化を見る前に、異なる時期に撮影した画像の特徴変化を把握する。植生の変化の影響を除くため、GIS データの建物の輪郭情報範囲内の画素に絞って特徴を確認する。SPOT 画像の各撮影時期について、建物輪郭情報内画素の明るさの値（以下、DN 値という）のヒストグラム分布と平均値を図 2-9 (a) から (d) に示す。



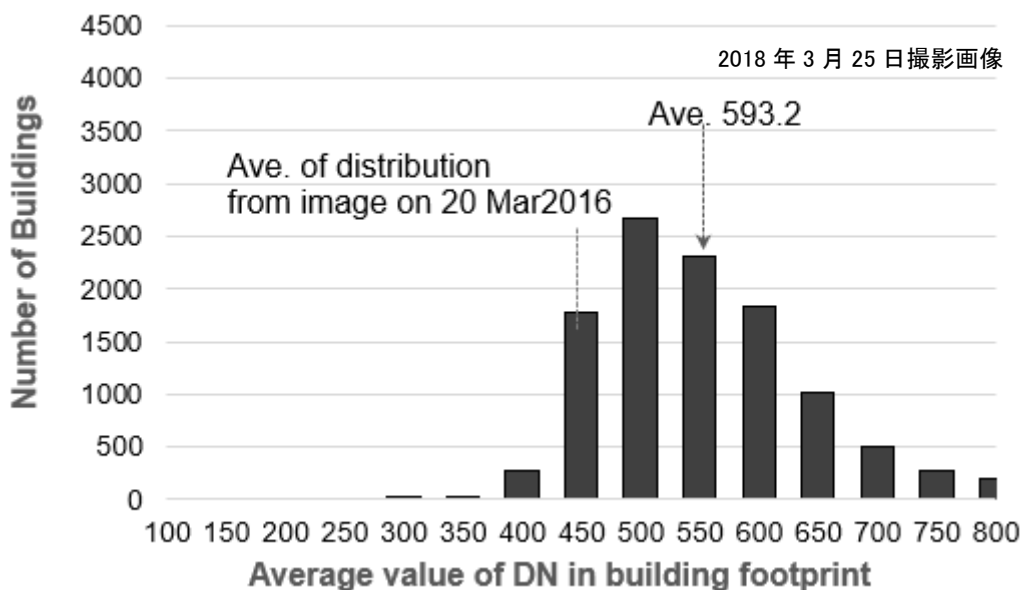
(a)



(b)



(c)



(d)

図 2-9 建物輪郭内の衛星画像の画素値のヒストグラム分布
 (a)2016年 3月 20日撮影; (b)2016年 7月 29日撮影;
 (c)2017年 1月 1日撮影; (d)2018年 3月 25日撮影.

図 2-9 のヒストグラムによると、2016 年 7 月に撮影された画像の平均値は、災害前の 2016 年 3 月の画像の平均値よりも大きい値であり、2017 年 1 月に撮影された画像の平均値は、2016 年 3 月の画像の平均値よりも小さくなっており、季節によって画素値の平均値が変化しているとわかった。しかし、撮影時期が同じであるにも関わらず、2016 年 3 月の画像と 2018 年 3 月の画像の平均値に差があり、時期によらず画像間の画素値の差を補正する処理が必要であることがわかる。

解体建物に関連する衛星画像の特徴、並びに図 2-9 のヒストグラム分布と平均値が変化していることを考慮した上で、解体建物付近の画像の特徴を調べる。2016 年 3 月 20 日、2016 年 7 月 29 日、2017 年 1 月 1 日及び 2018 年 3 月 25 日に撮影した SPOT 衛星画像の上に GIS データの輪郭情報と一部の教師データの色分けしたデータを重ねて図 2-8 に表示する。表 2-1 に示した衛星画像は 1.5m 解像度のパンクロ（白黒）16bit 画像と 4m 解像度のカラー画像があり、パンシャープン画像（カラー合成した高解像度画像）を作成することも可能であるが、パンクロ 16bit 画像のみを扱う方がコントラストや明るさの変化を確認しやすく、解体建物の判別結果の正誤を比較しやすいため、パンクロ画像による解析を試みることにした。解体建物と現存建物それぞれの周辺を見比べてみると、解体建物付近が明るくなっていることがわかる。先に示したように、画像全体の明るさが撮影日により変動し、単純な差分変化では解体による変化と季節による変化でキャンセルされる可能性も考えられるため、この点を考慮して解体による変化を算出する方法を検討する。

そこで、全ての建物輪郭内の画素 DN 値の平均 (Average) を式 (2-1) により計算し、

第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

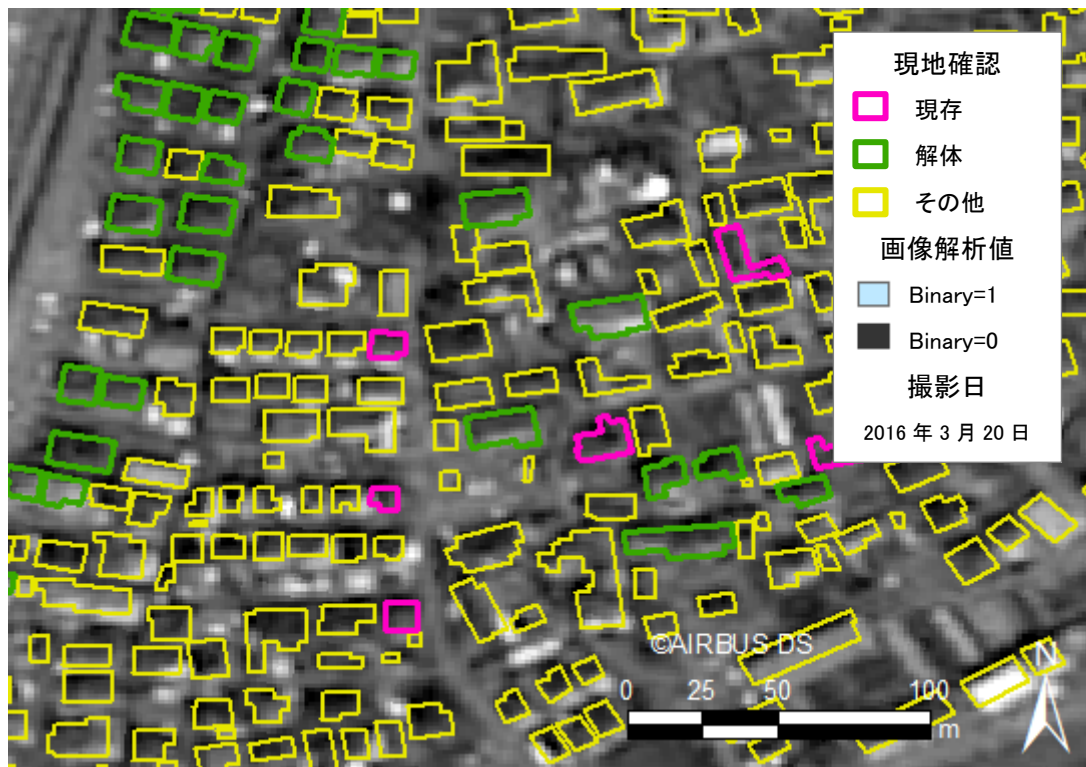
条件式 (2-2) のように平均値より大きい場合に 1、平均値より小さい場合に 0 とする、2 値化画像 (Binary 画像) を作成した。

$$Average = \frac{\sum_{i=1}^N DN_i}{N}, \quad \dots \text{式 (2-1)}$$

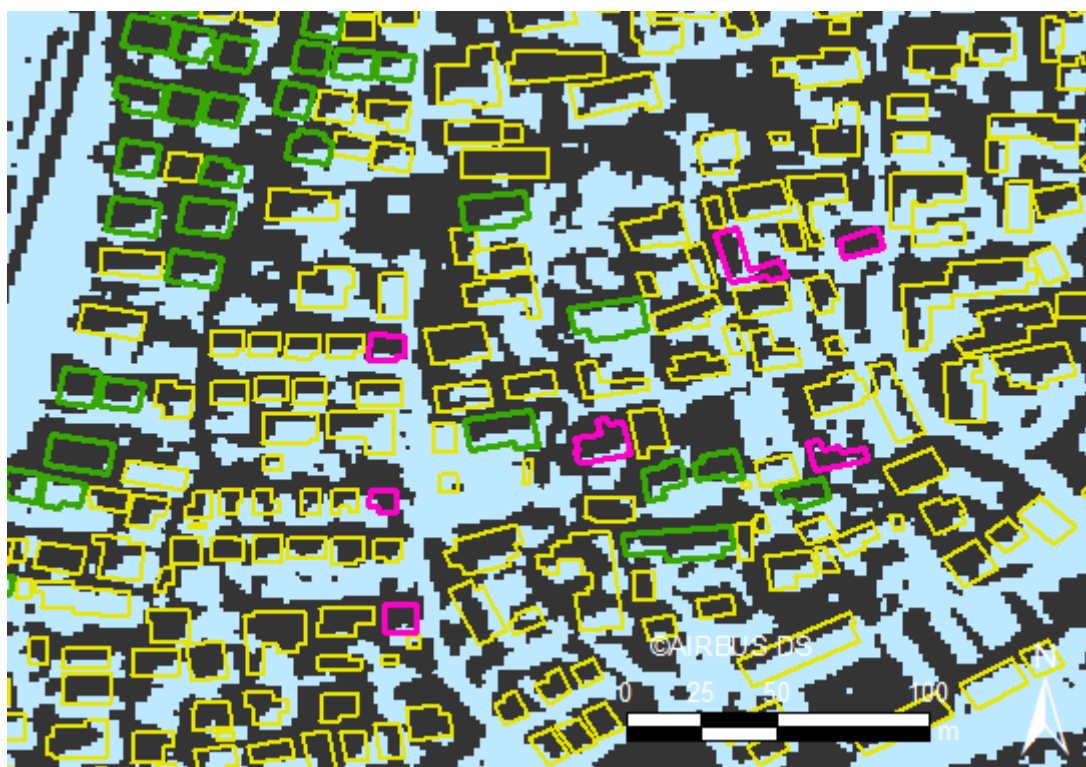
ここで、 N は全体の建物輪郭内の画素数である。

$$Binary = \begin{cases} 1, & (DN > Average) \\ 0, & (DN \leq Average) \end{cases} \quad \dots \text{式 (2-2)}$$

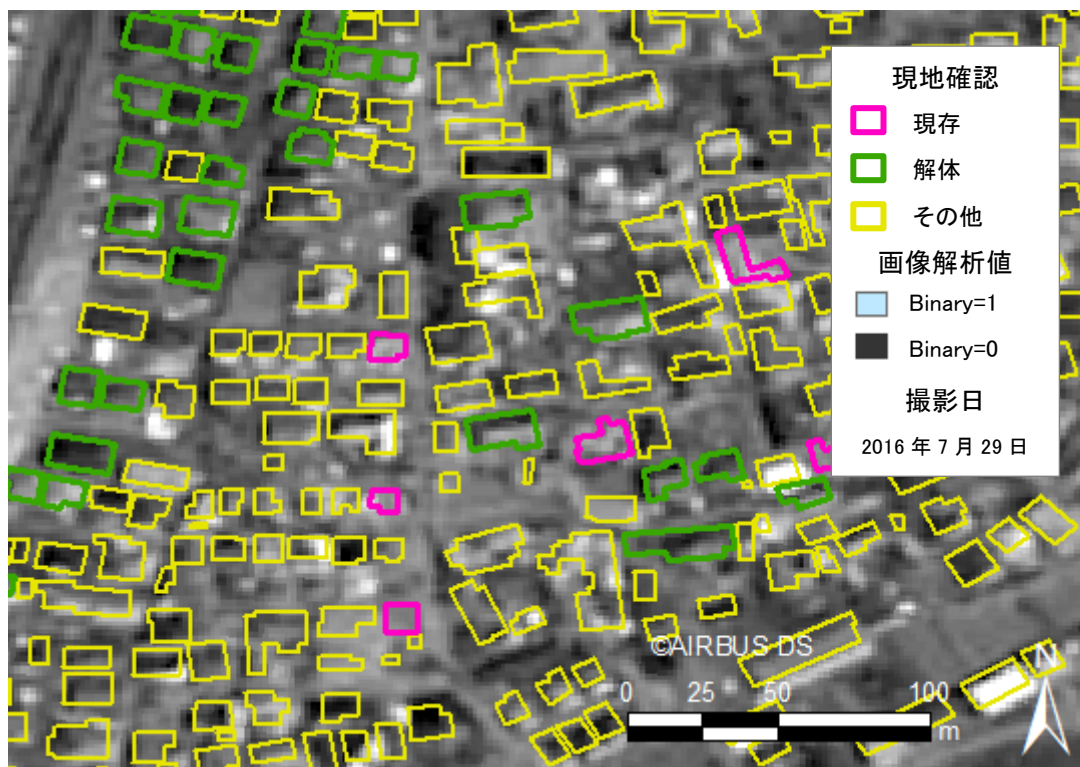
式 (2-1) と式 (2-2) によって、各撮影日の衛星画像から Binary 画像を作成する。現地で解体建物と現存建物を確認した付近で、前画像の 2016 年 3 月 20 日と後画像の 2016 年 7 月 29 日、2016 年 7 月 29 日及び 2018 年 3 月 25 日の衛星画像と画像解析した Binary 画像を図 2-10 (a) から (i) に示す。



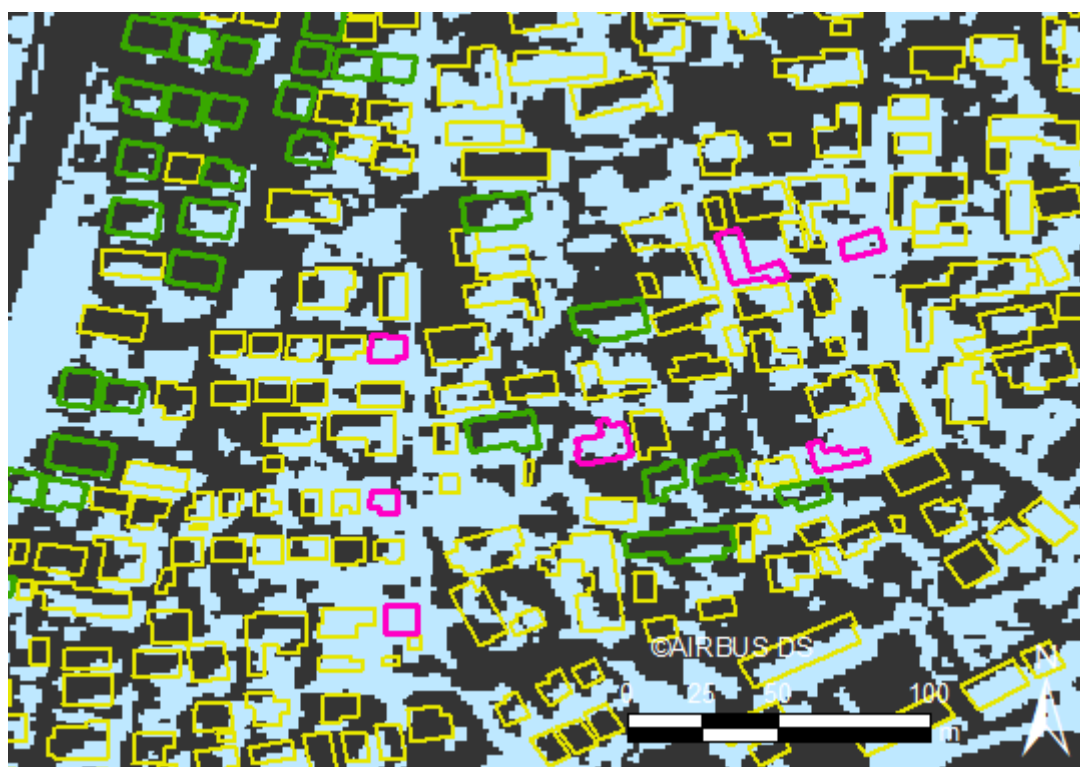
(a)



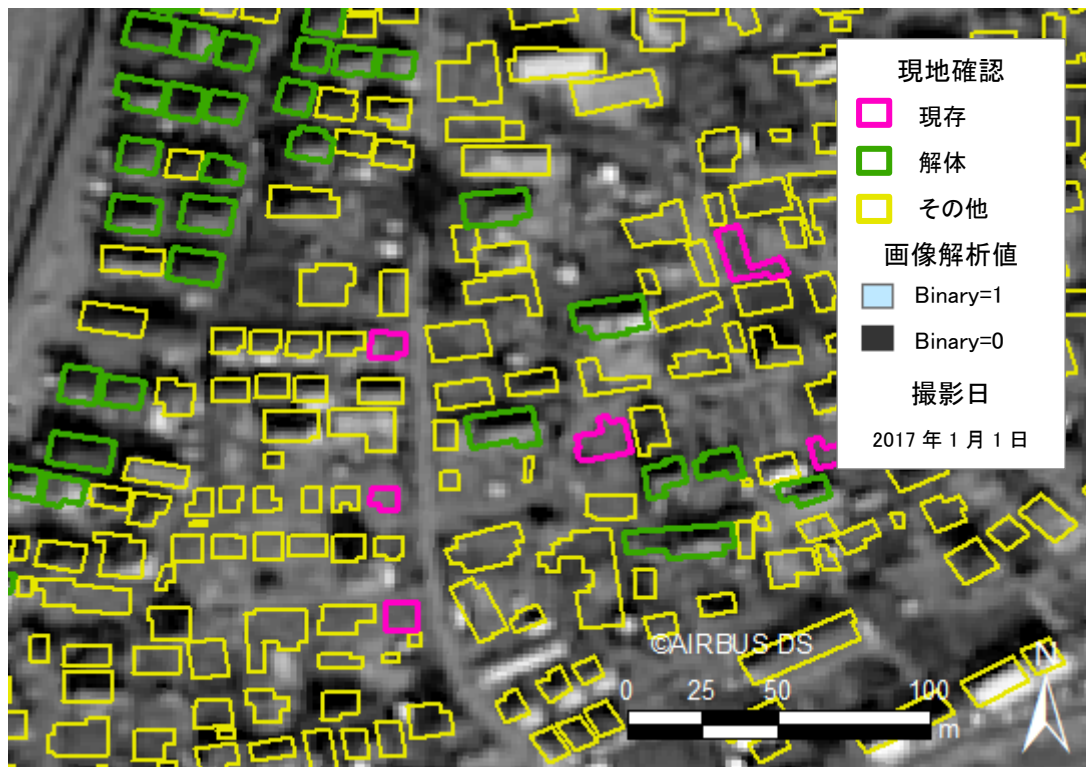
(b)



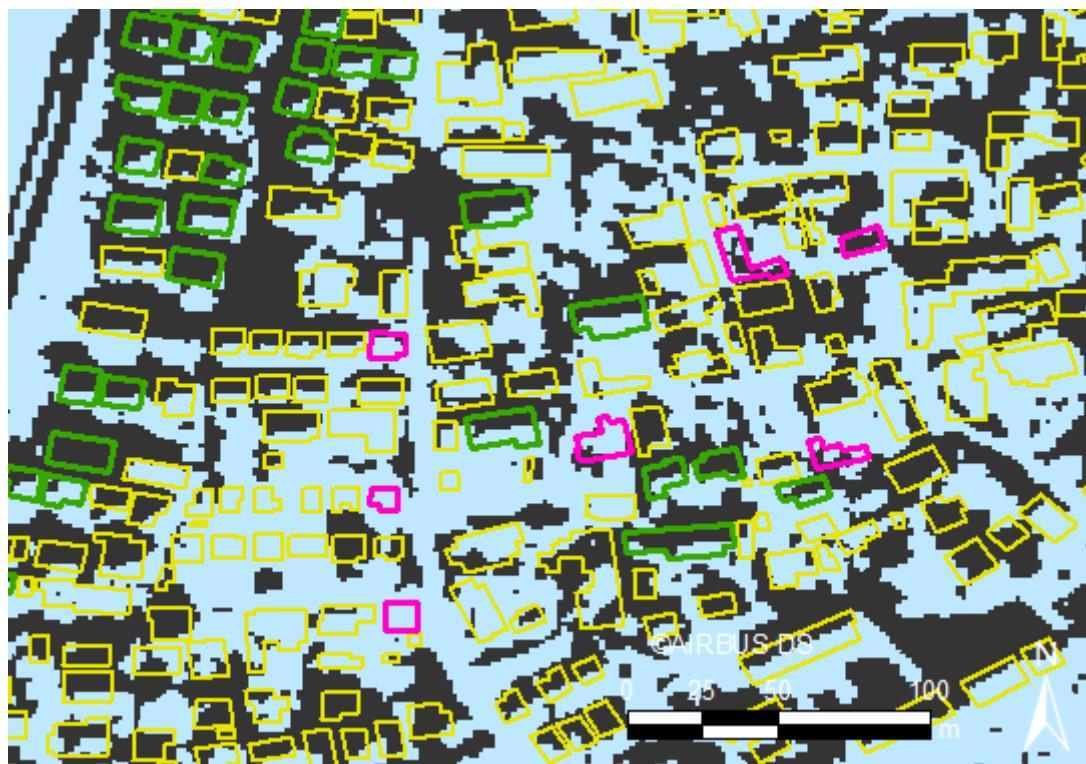
(c)



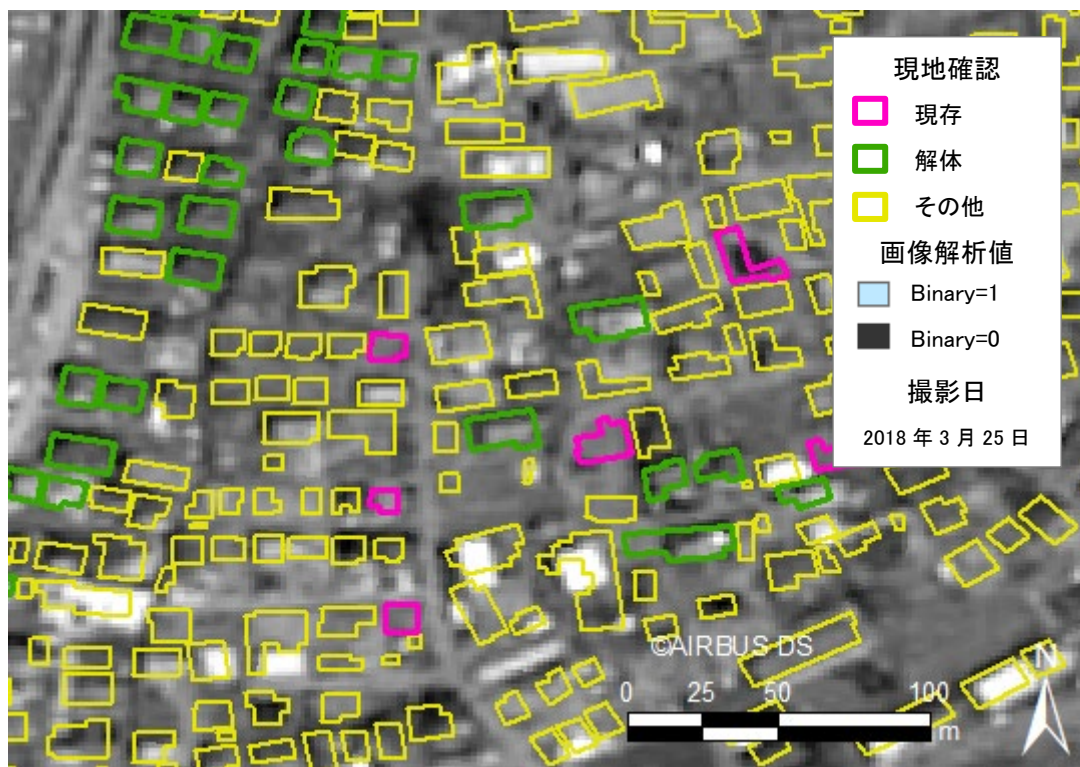
(d)



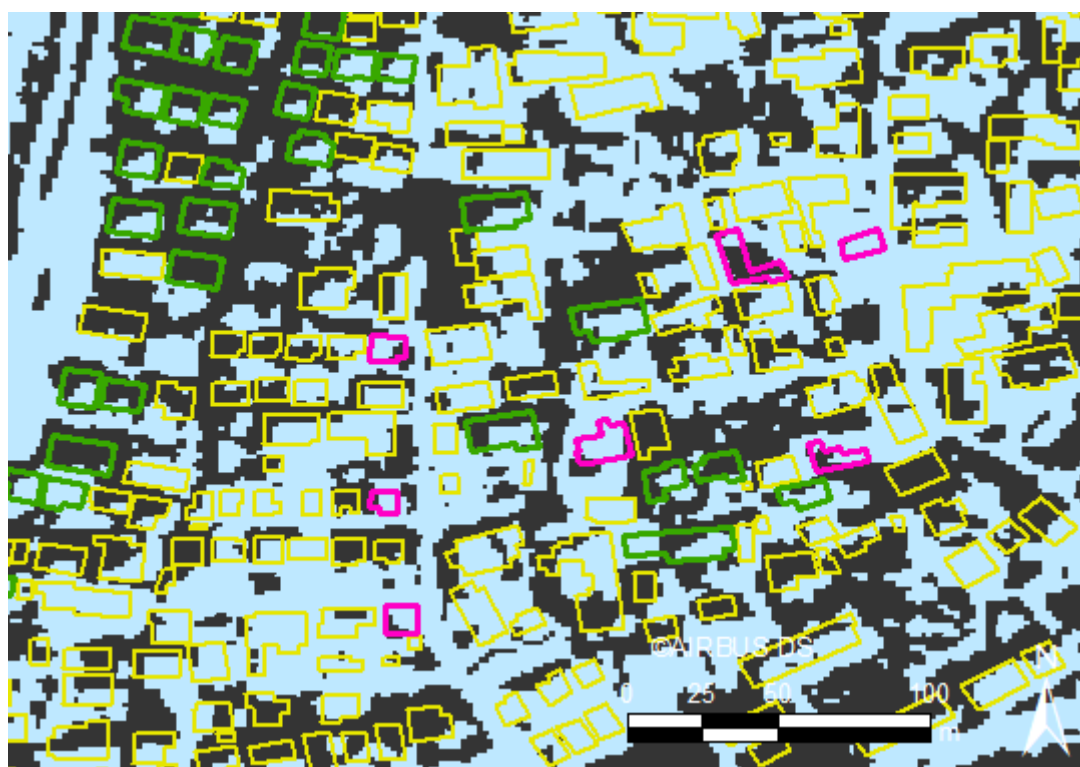
(e)



(f)



(g)



(h)

図 2-10 現地調査で確認した箇所の衛星画像と Binary 画像
 (a)2016年3月20日撮影画像；(b)同 Binary 画像；

第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

- (c)2016年7月29日撮影画像；(d)同 Binary 画像；
(e)2017年1月1日撮影画像；(f)同 Binary 画像；
(g)2018年3月25日撮影画像；(h)同 Binary 画像；

図2-10 (b, d, f, h)の Binary 画像を見ると、解体建物の輪郭内で、地震前の Binary 画像の0(黒)であった画素が、地震後に1(水色)になっている画素が多くなっていることがわかる。そのため、地震前の Binary 画像を Binary before、地震後の Binary 画像を Binary after として、地震前後の Binary 画像の変化を示す Binary flag を条件式(2-3)により決定し、式(2-4)によって建物輪郭内の画素について Binary flag が1となっている割合を算出する。

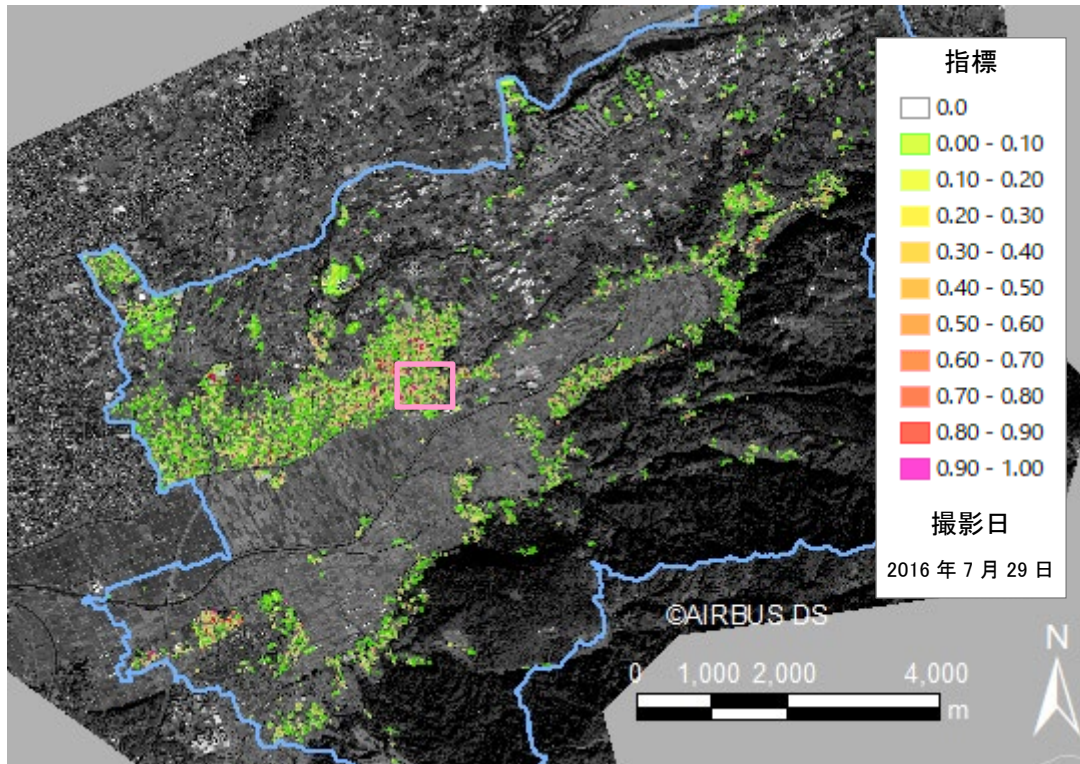
$$Binary_flag = \begin{cases} 1, & (Binary_{after} - Binary_{before} > 0) \\ 0, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad \dots \text{式 (2-3)}$$

$$Ratio = \frac{\sum_{i=1}^M Binary_flag_i}{M}, \quad \dots \text{式 (2-4)}$$

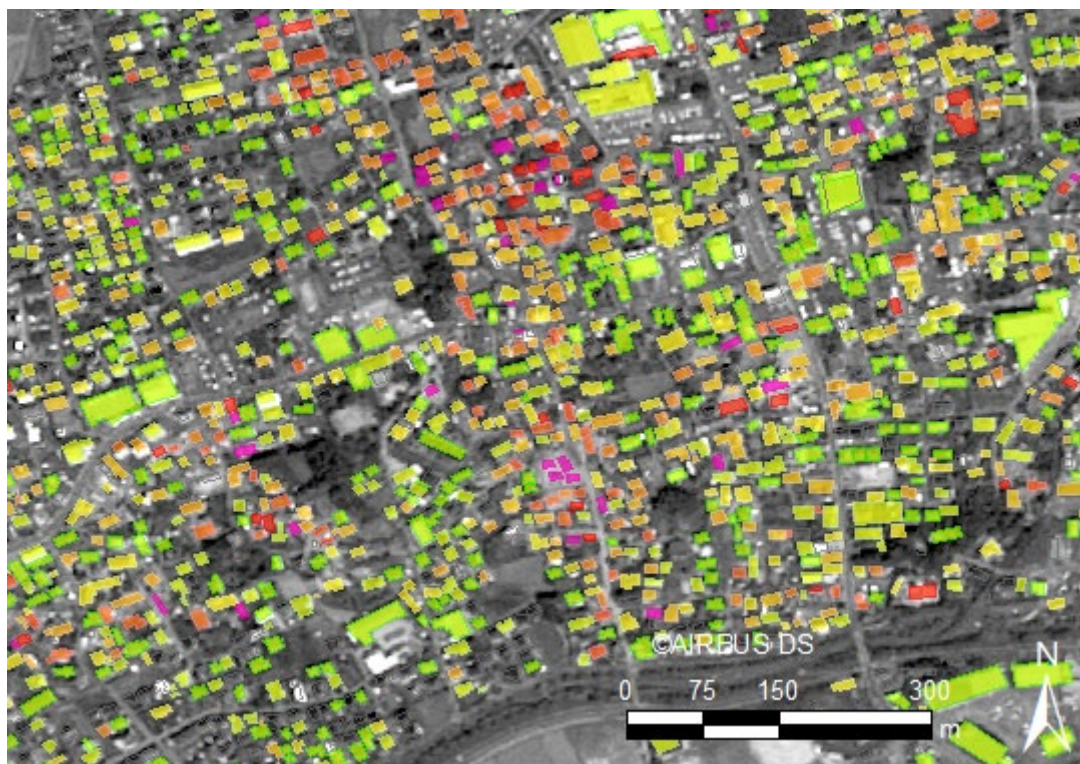
ここで M は1つの建物輪郭情報内の画素数である。

式(2-4)によって、全ての建物輪郭情報内の Ratio を計算すれば、Ratio が大きい場合は解体建物である可能性が高く、小さい場合は現存建物である可能性が高くなると考え、解体建物を識別する指標として扱ってみる。前画像の2016年3月20日と後画像の2016年7月29日、2016年7月29日及び2018年3月25日について Ratio を計算し、画像解析による指標として色付けした分布を図2-11の(a-f)に示す。

第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

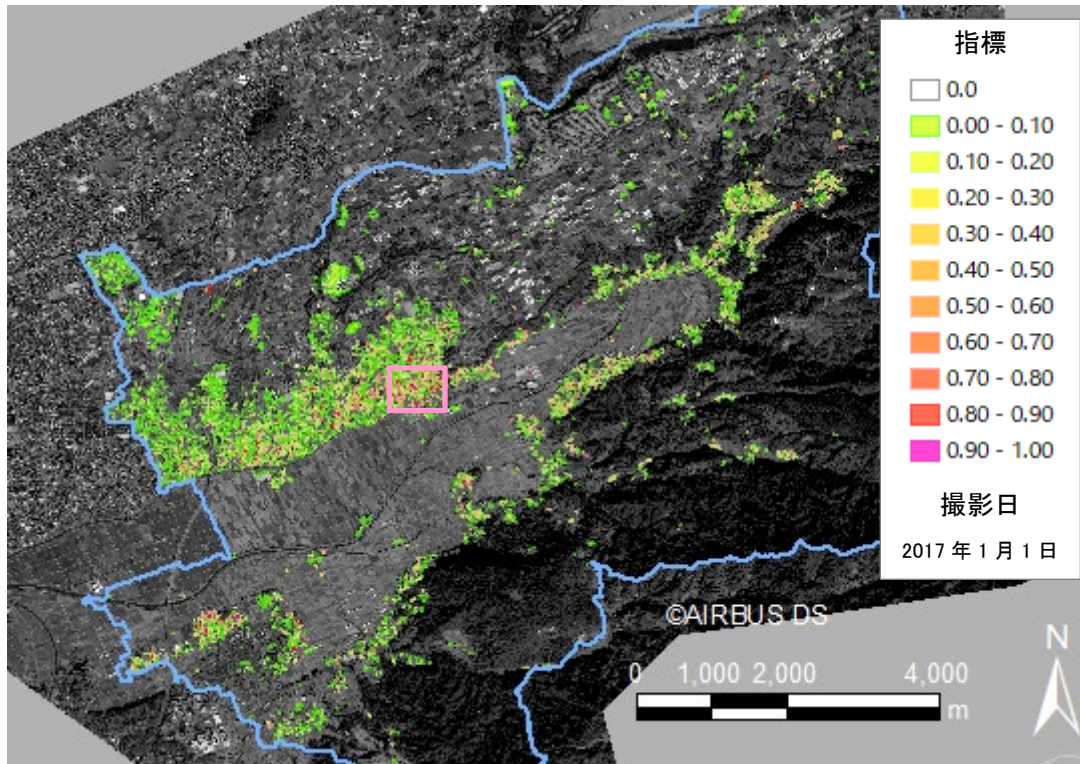


(a)

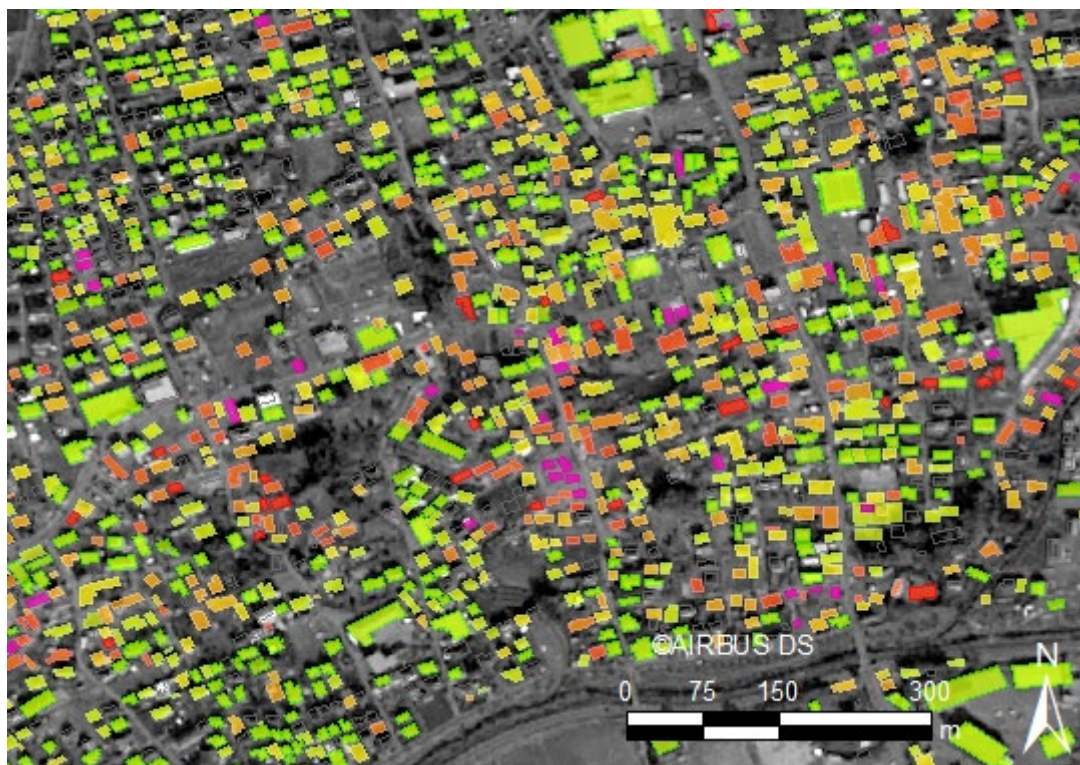


(b)

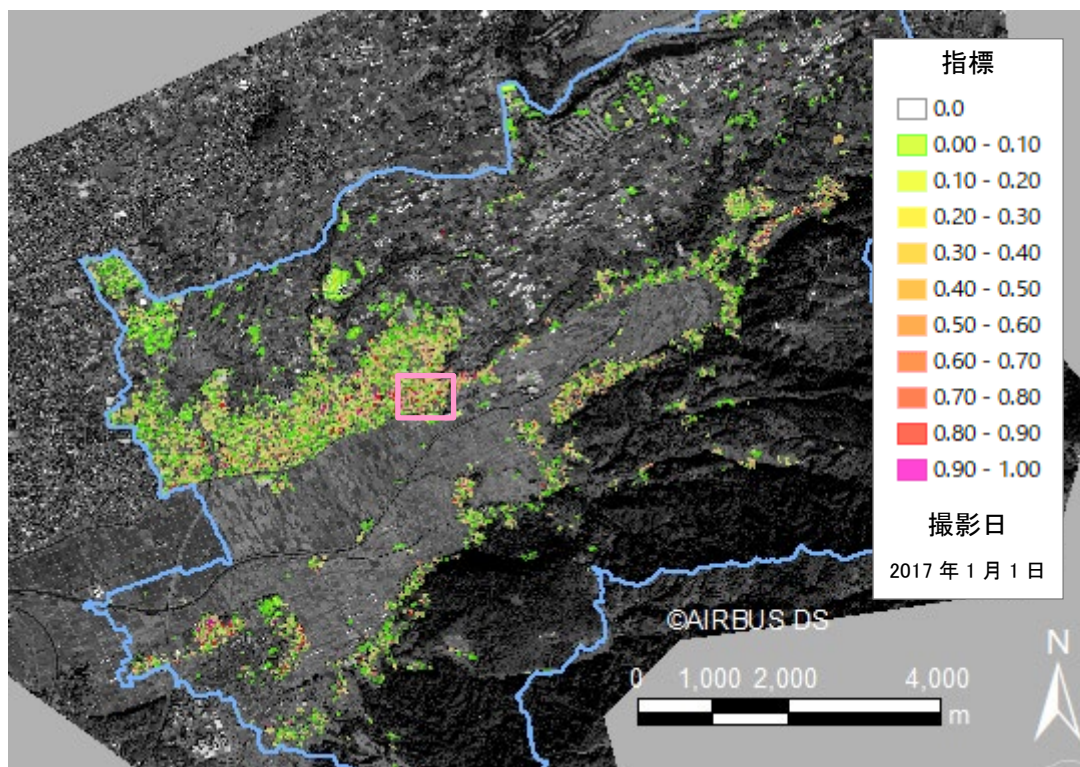
第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成



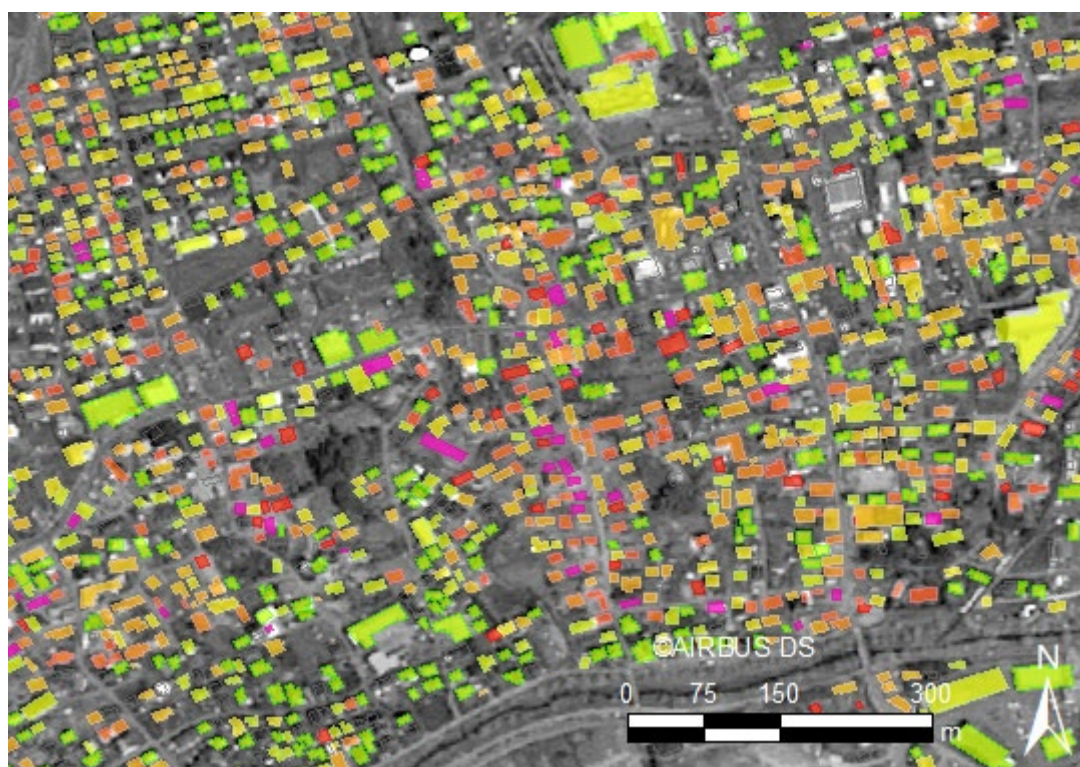
(c)



(d)



(e)



(f)

図 2-11 衛星画像に重畳した画像解析指標の分布
(a)2016年7月29日撮影画像に画像解析指標；(b)同拡大画像；

- (c)2017年 1月 1日撮影画像と画像解析指標；(d) 同拡大画像；
- (e)2018年 3月 25日撮影画像と画像解析指標；(f) 同拡大画像；

2.2.4 画像解析指標の評価

解体建物付近の特性に着目して作成した画像解析指標が解体建物の識別に有効か確認する。地震後の2016年7月29日、2017年1月1日、2018年3月25日のいずれ日でも一貫して解体建物、または現存建物と目視で確認した建物を選択し、評価用データとする。益城町の建物GISデータの中から、55個の解体建物と55個の現存建物を選定した。評価用データの建物に対して画像解析指標の閾値によって解体建物か現存建物に分類して、評価用データの分類性能がどの程度真の値となるか確認する。実際の状況、つまり評価用データの解体建物を True、現存建物を False とし、指標により解体建物と推定される場合は Positive、現存建物と推定される場合は Negative として、表 2-2 の混同行列のように True Positive(TP)、False Negative(FN)、False Positive(FP)、True Negative(TN)を定義する。

表 2-2 画像解析指標による解体建物分類の混同行列

		画像解析指標での分類	
		解体 (Positive)	現存 (Negative)
実際の状況 (評価用データ)	解体 (True)	True Positive (TP)	False Negative (FN)
	現存 (False)	False Positive (FP)	True Negative (TN)

性能評価には ROC カーブ^[16]を用いる。ROC カーブとは、式 (2-5) による、False Positive Rate を X 軸に、式 (2-6) による True Positive Rate を Y 軸にプロットしたグラフである。

$$False\ Positive\ rate\ (FP\ rate) = FP / (FP + TN) \quad \dots\text{式 (2-5)}$$

$$True\ Positive\ rate\ (TP\ rate) = TP / (TP + FN) \quad \dots\text{式 (2-6)}$$

画像解析指標で、0.0~1.0 まで 0.1 刻みずつ閾値変化させ解体・現存に分類し、表 2-2 の混同行列の分類結果と実際の解体・現存との正誤で振り分けられ、式 (2-5) と式 (2-6) を FP rate と TP rate を計算できる。2016年7月29日、2016年7月29日及び2018年3月25日の画像で FP rate と TP rate を計算し、描写した ROC カーブを図 2-12 に示す。Area under curve (AUC) ^[17]が大きいほど、解析モデルの分類性能がよく、AUC の理論的的最大値は 1.0 であり、0.9 以上であれば分類性能がよいといわれている。図 2-12 の AUC は3つの時期いずれの解析結果も 0.98 以上であり、良好な分類モデルであるといえる。

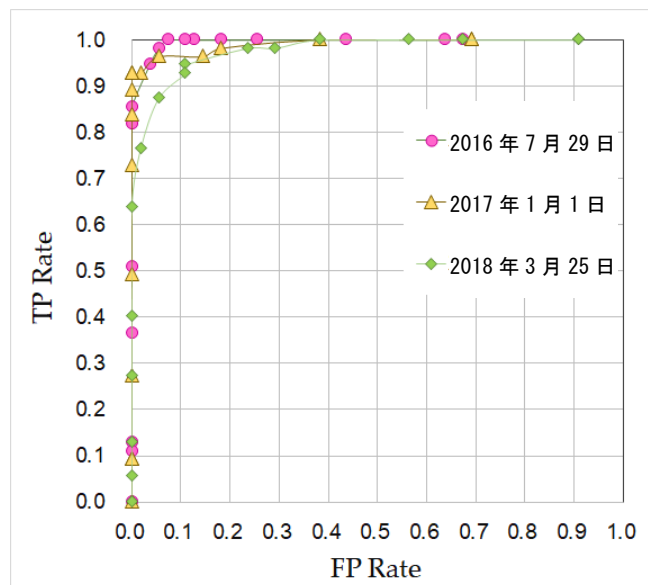


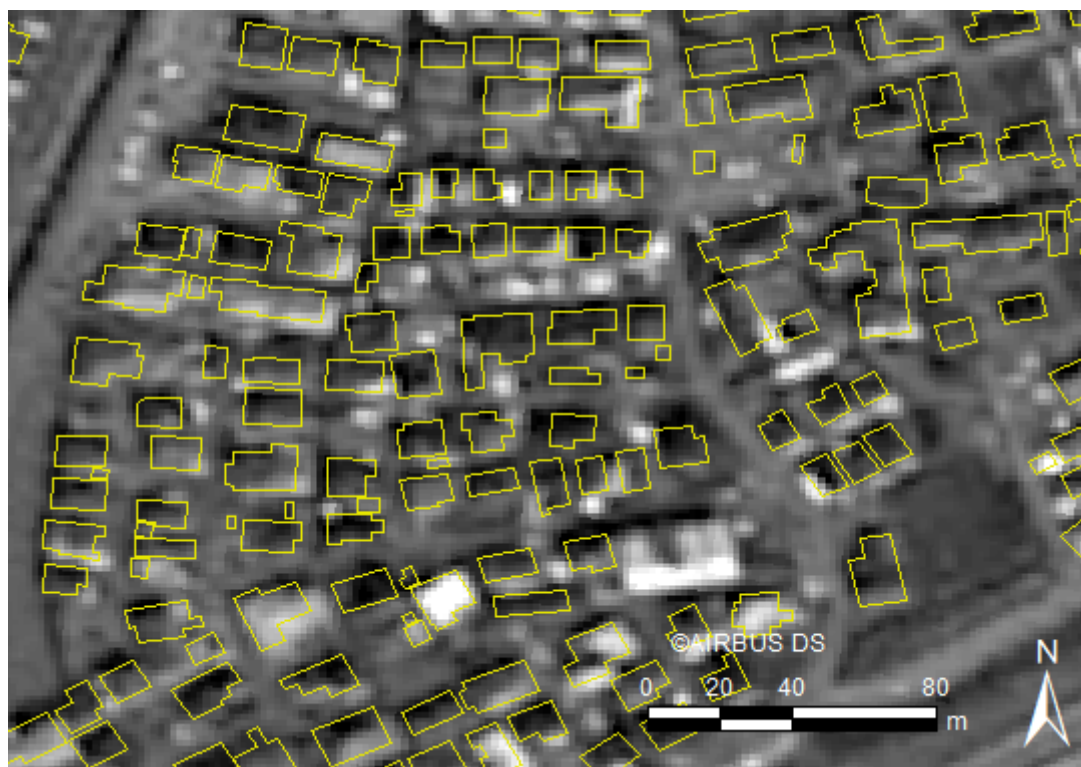
図 2-12 画像解析指標の閾値による分類結果のROCカーブ

2.2.5 画像解析指標を参照した益城町全体の解体建物の目視判読

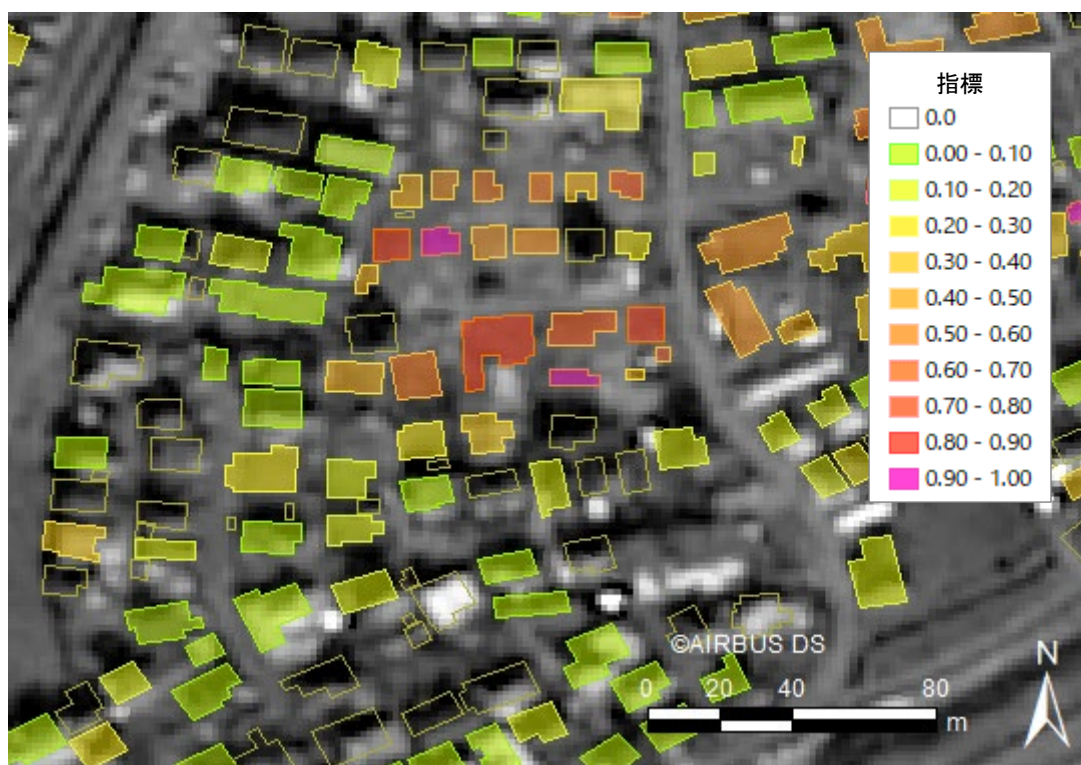
SPOT および Pleiades 衛星画像に画像解析指標を図 2-13 のように重ね合わせ、目視判読を行い、解体された建物を識別した。Pleiades と SPOT 衛星画像は、同じ日の 2017 年 1 月 1 日に撮影した画像があるため、2 種類の分解能の見え方の違いを理解することができたことは、目視判読では非常に効果的であった。2016 年 7 月 29 日と 2018 年 3 月 25 日に撮影した衛星画像は SPOT 画像しかないが、分解能が粗くなっても影や明るさの違いは SPOT 画像でも分かる。解体建物および現存建物における画像には、次のような特徴がみられた。これらの特徴を踏まえて、複数の撮影回数のある SPOT 画像を確認し解体建物の識別を行った。

- ・益城町では、瓦屋根の構造の建物が多く、その建物の屋根が周辺より暗いことが多い。
- ・現存建物には、南側の壁や屋根が明るく写る。
- ・現存建物には、建物の北側に影が写る。
- ・現存建物には、建物や屋根の境界部分で明るさの違いやエッジがみられる。
- ・建物が解体されている場合は、建物周辺の明るさと均質になっている。
- ・益城町は瓦屋根の家が多く、瓦屋根がある場合は暗く、解体されている場合は明るくみえることが多い。

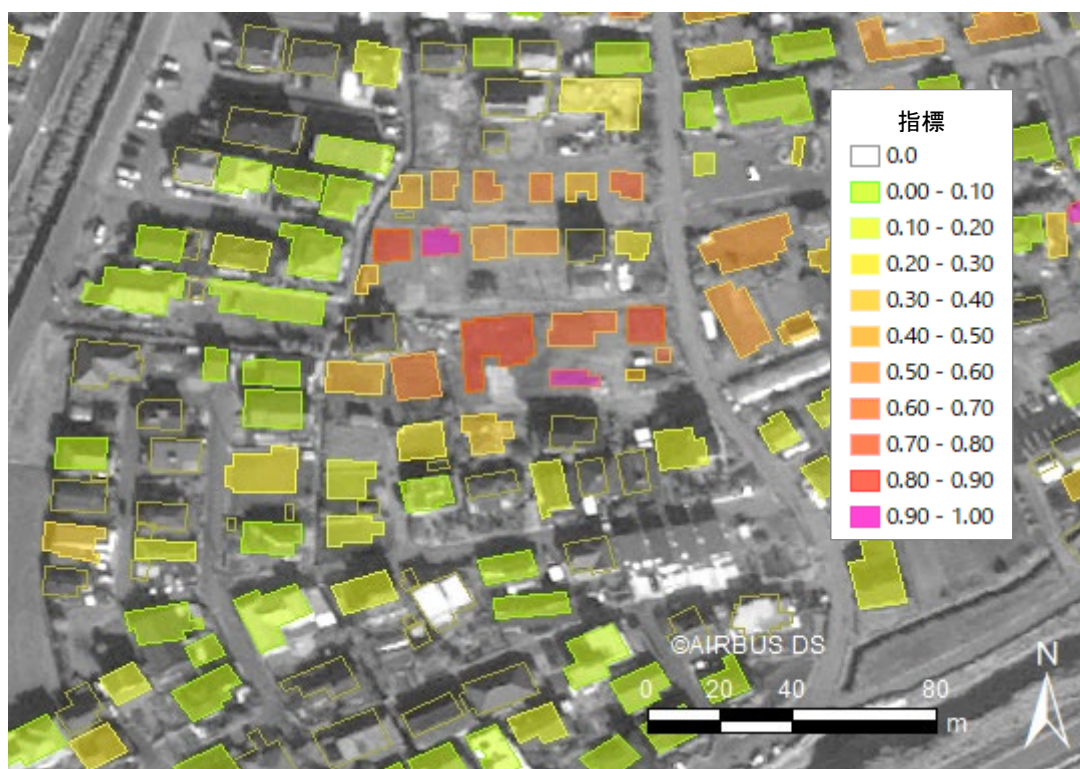
これらの特徴を踏まえて、複数の撮影日の SPOT 画像を確認し解体建物の識別を行った。



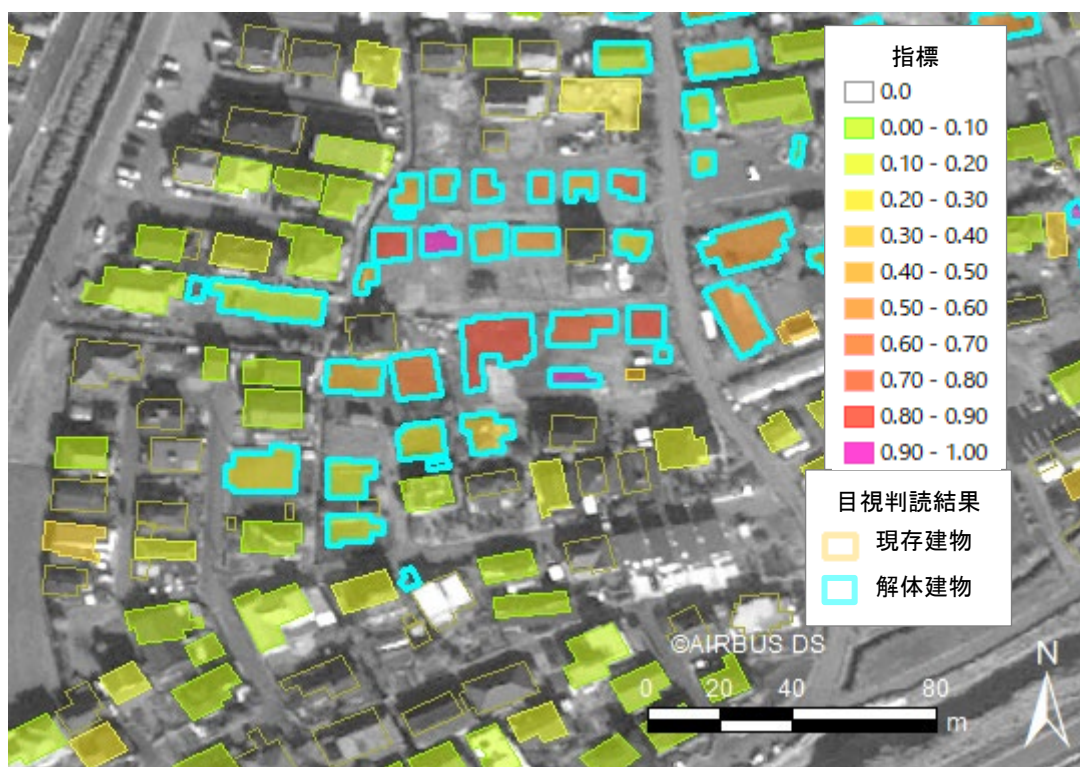
(a)



(b)



(c)



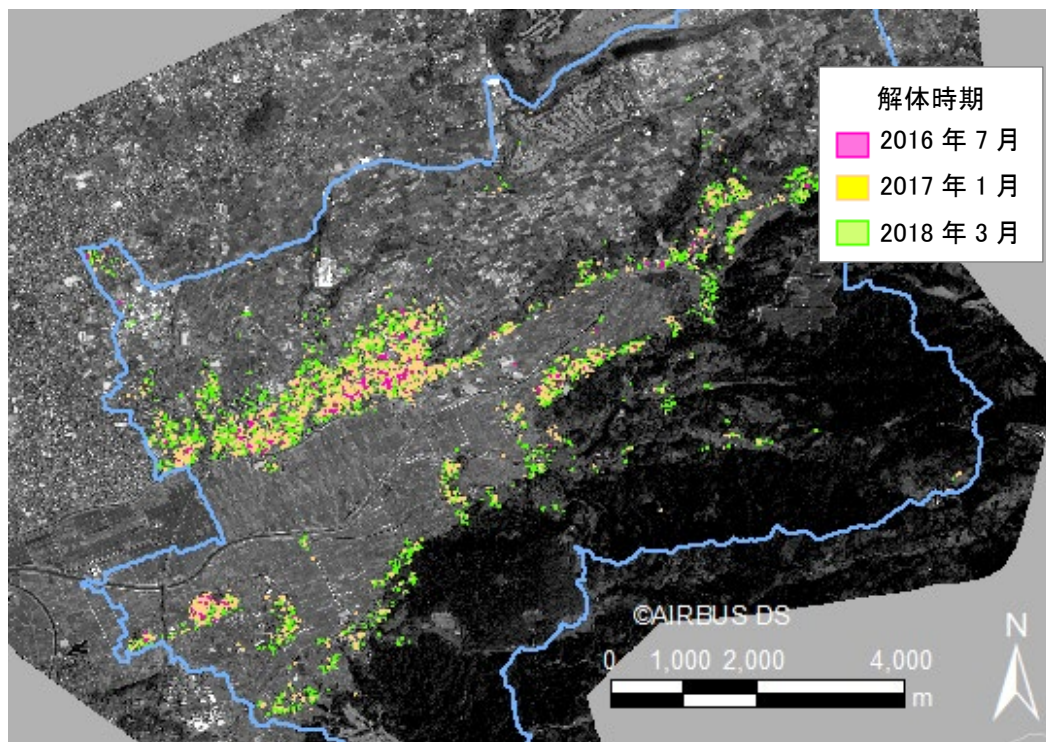
(d)

図 2-13 参照した画像解析指標と解体建物の目視判読結果
 (a)2016年3月20日撮影のSPOT画像に建物輪郭のみ重畳;

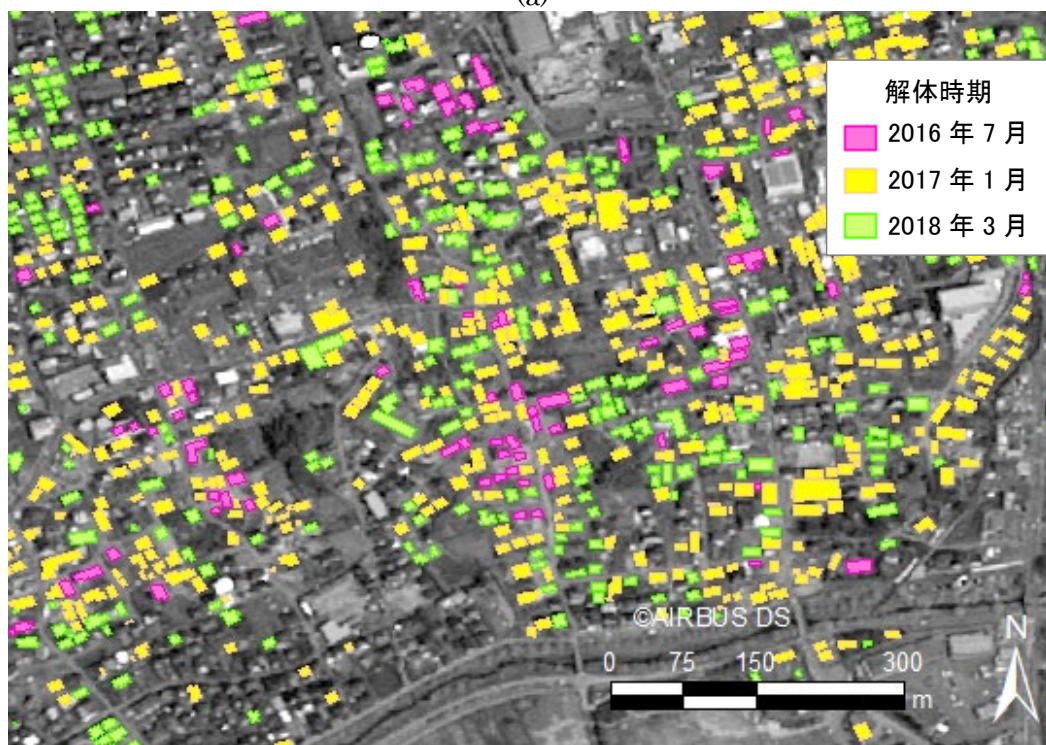
第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

- (b) 2017年1月1日 SPOT 画像に画像指標重畳;
- (c) 2017年1月1日 Pleiades 画像 (50cm 解像度) に画像指標重畳;
- (d) 衛星画像と指標を参照して目視判読した解体建物.

この方法によって、益城町の全ての建物を目視判読し、解体建物を識別した。衛星画像の各撮影日で識別できた解体建物の分布を図 2-14 に示す。益城町では解体申請に基づき、毎月の解体建物の棟数が記録されている。本研究で目視判読した解体建物棟数と画像撮影日に近い月末の益城町の報告による解体建物棟数(実績)を表 2-3 に示す。



(a)



(b)

図 2-14 解体建物と解体時期の分布

(a) 益城町全体の解体建物の分布と 2018 年 3 月 25 日 SPOT 画像; (b) 中心部の拡大.

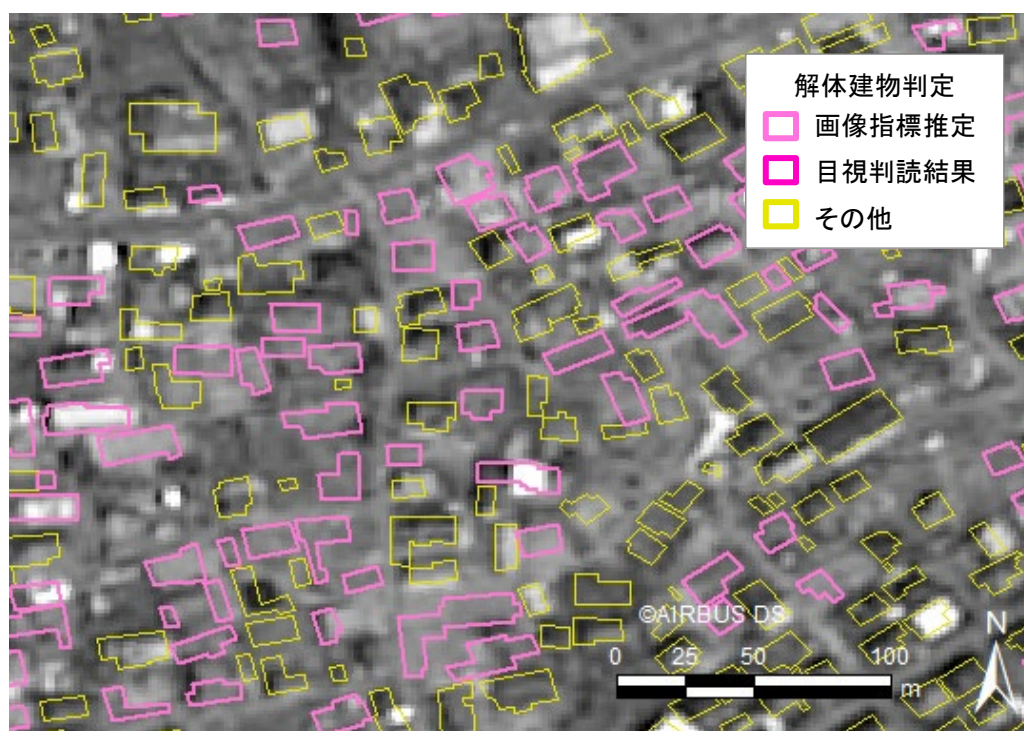
表 2-3 本研究の目視判読結果と益城町の報告の解体建物数比較

衛星画像の撮影日	2016年7月29日	2017年1月1日	2018年3月25日
画像の目視判読棟数	234	2,837	5,701
益城町の報告月	2016年7月	2016年12月	2018年3月
益城町の報告棟数	219	2,395	5,702

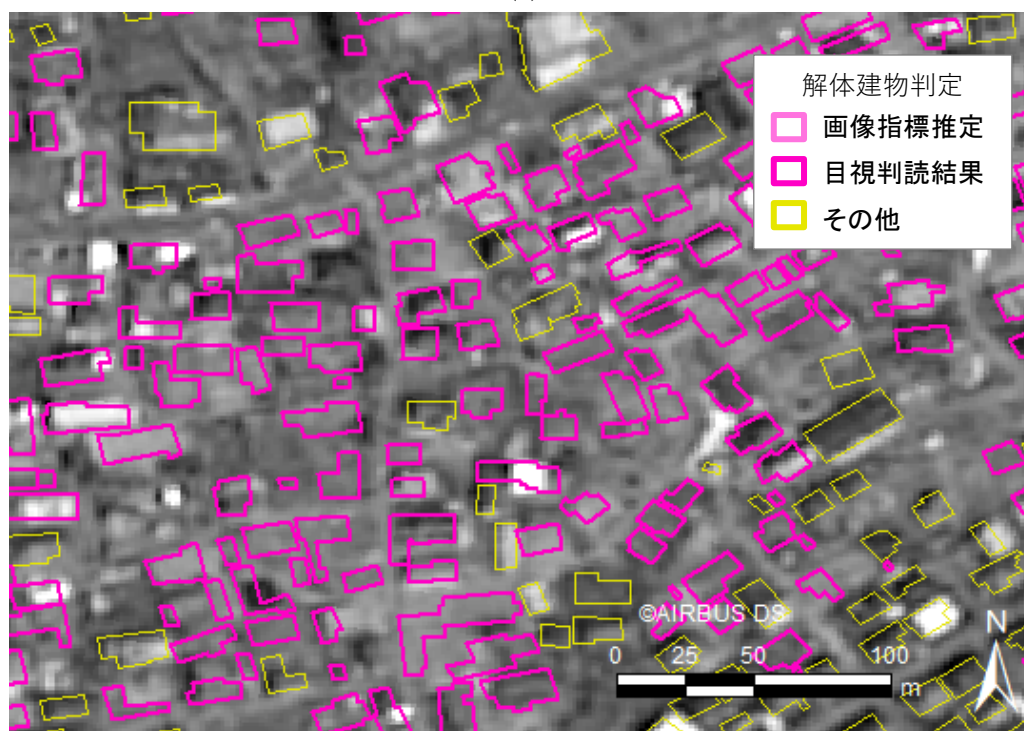
益城町の報告は月末であり、衛星画像の撮影日は2～5日以内と近い日である。2017年1月1日の衛星画像で判読した解体建物数が2016年12月末の益城町の報告より多い。益城町で、建物の解体にかかる日数はおおよそ2～3週間程度かかっている。また、2017年1月の1か月間に解体された棟数は約800棟あり、約2年間で最も解体建物棟数が多い月であったことから、多くの解体途中の建物を解体建物として識別した可能性がある。益城町の報告によると、災害廃棄物処理事業が完了した2018年3月末時点の解体建物が5,702棟であり、衛星画像で識別できた解体建物数が5,701棟とほぼ同じ棟数であることから、益城町の解体建物の全数調査はできたと考えてよい。これによって、全ての建物について解体建物か現存建物かを建物データベースに付与することができた。

2.2.6 画像解析指標で誤分類となる要因と考察

解体建物と現存建物を正しく分類した例および誤って分類した例について、画像の特徴を確認しながら要因を考察する。まず、指標の閾値分類により正しく解体建物と分類した、TPの例を図2-15に、正しく現存建物として分類した、TNの例を図2-16に、誤って解体建物として分類した、FPの例を図2-17と図2-18に示す。図2-17と2-18のFPの例では、どちらも画像の輝度値が著しく明るくなっていることが誤分類の原因である。図2-17については、建物の屋根にソーラーパネルなどの設備が設置されている状況を確認できた。図2-18については建物の壁面や屋根からの強い反射があることを確認できた。どちらも、太陽光の入射角と衛星センサの撮影角との関係で発生し得るもので、不可避な条件である。



(a)

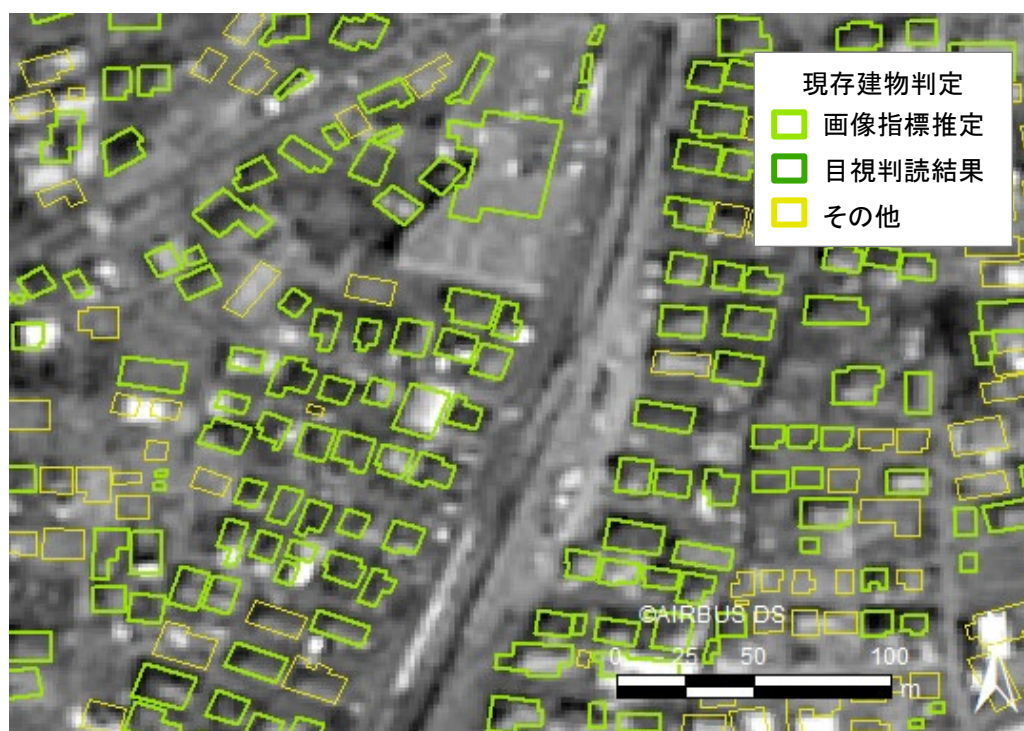


(b)

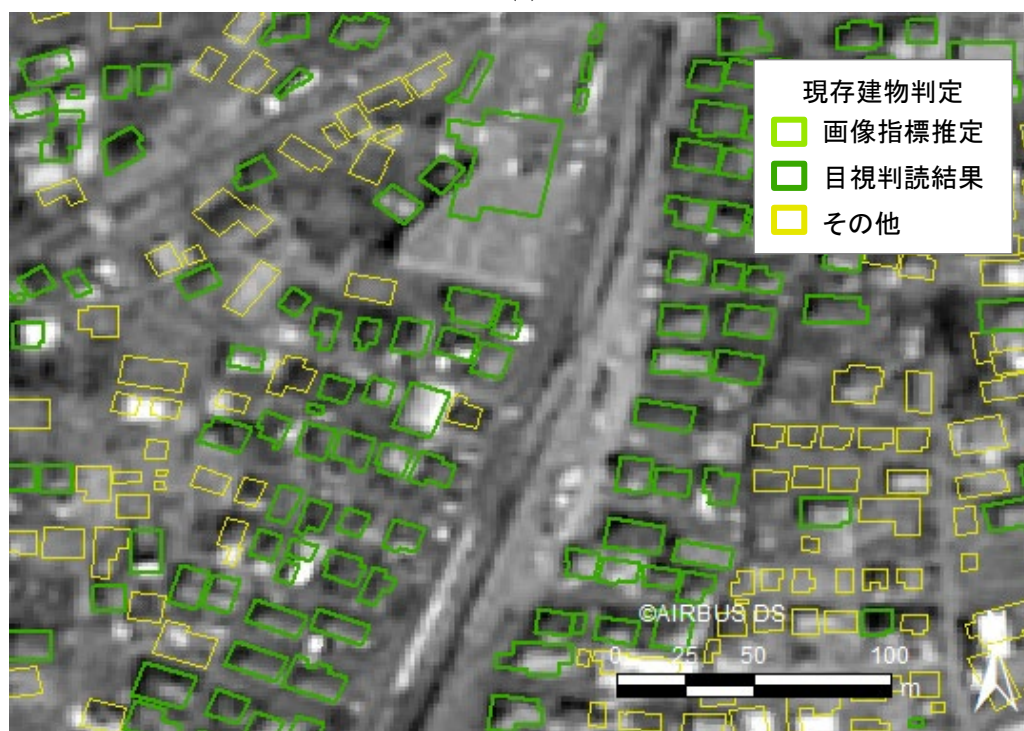
図 2-15 画像解析指標で解体建物を多く推定 (TP) した部分

(a) 2018年3月25日のSPOT画像による解析指標の閾値による解体建物推定;

(b) 2018年3月25日のSPOT画像と目視判読による解体建物.



(a)

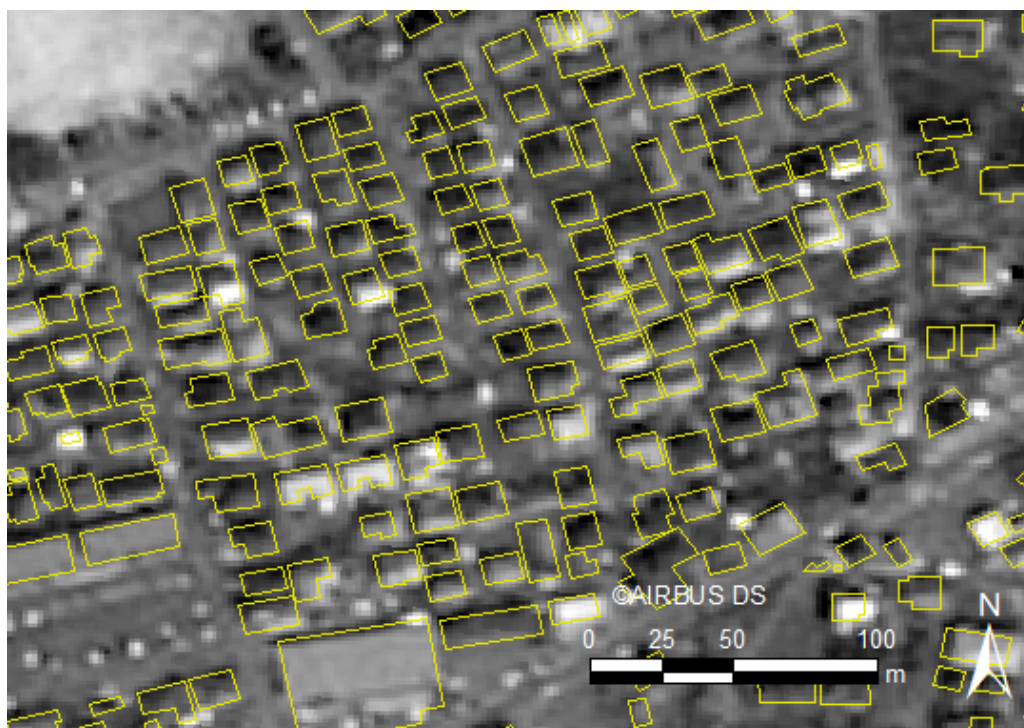


(b)

図 2-16 画像解析指標で現存建物を多く推定 (TN) した例

(a) 2018年3月25日のSPOT画像による解析指標の閾値による現存建物推定;

(b) 2018年3月25日のSPOT画像と目視判読による現存建物.



(a)

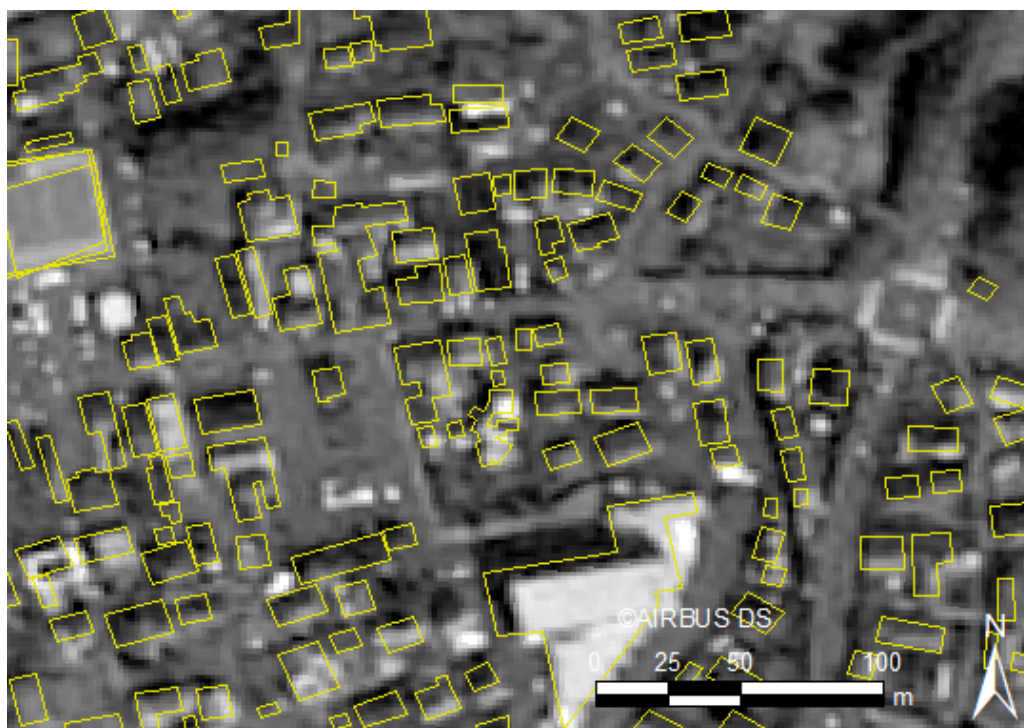


(b)

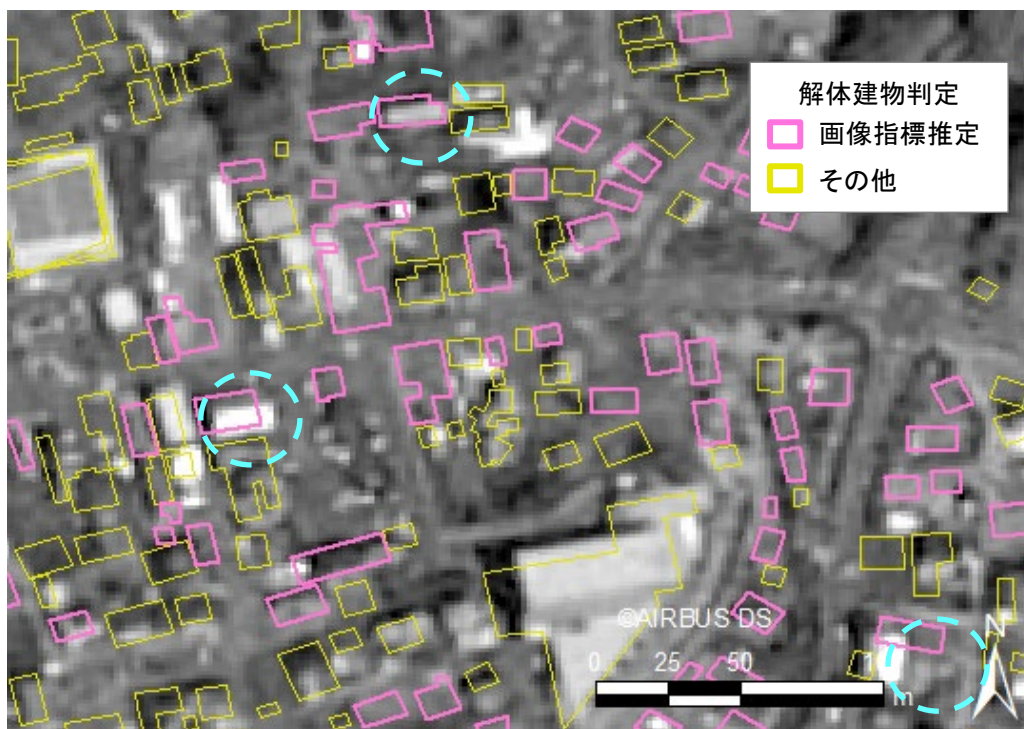
図 2-17 屋根のソーラーパネル等の反射により解体建物（FP）に誤分類した例

(a) 2016年3月20日のSPOT画像；

(b) 2018年3月25日のSPOT画像と誤って解体建物と推定した箇所.



(a)



(b)

図 2-18 建物の壁や屋根からの反射光により解体建物の誤分類 (FP) した例

(a) 2016年3月20日のSPOT画像;

(b) 2018年3月25日のSPOT画像と解体建物の誤分類された箇所.

第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

目視判読で解体建物であるにもかかわらず、誤って現存建物として分類されている原因として建物輪郭内の面積が小さいことによって変化をとらえにくい可能性があると考えられる。その傾向を把握するため、OSM データの建物輪郭の面積と指標による推定結果の関係を検討した。平成30年住宅・土地統計調査によると、益城町の住宅1件の延床面積の平均が約120m²である。そこで、2018年3月25日のSPOT画像の結果について、平均延床面積の約半分である60m²で区分して、OSM データの建物輪郭の面積が60 m²以下の建物に対して画像解析指標の閾値0.3で解体建物を分類した混同行列を表2-4に、60 m²より大きい建物に対して同様に解体建物を分類した混同行列を表2-5に示す。表2-4及び表2-5の結果から、表2-6に示すPrecision, Recall, Specificity, Accuracy, F-measureを算出した。(各評価値の式は付録1に示す。) Recall, Accuracy, F-measureについて、面積60 m²より大きい建物は推定精度が高い。面積が60 m²以下である場合には、recallが0.372と低く、解体・現存の推定が難しいことを示しており、建物輪郭の面積が小さいために明るさ変化を捉えにくいためと考える。図2-19には建物輪郭の面積が小さく、解体建物による明るさ変化をとらえられず分類結果がFNとなっている例を示す。

表 2-4 建物輪郭面積 60m²以下の建物に対して指標の閾値 0.3 で分類した混同行列

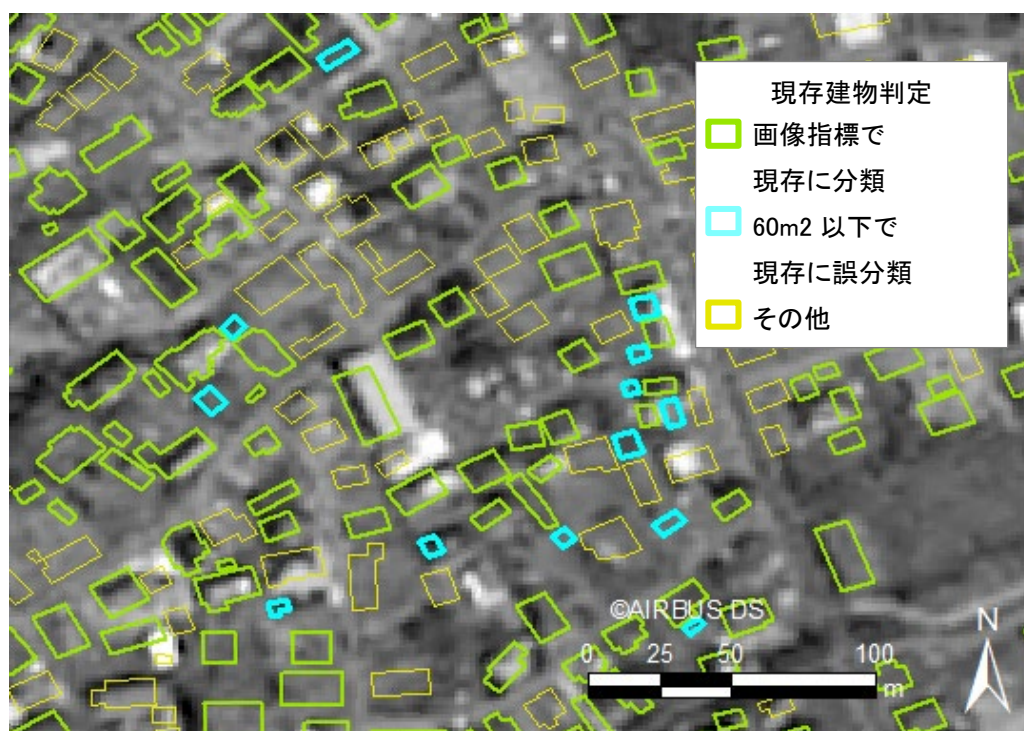
		画像解析指標による分類		
		解体	現存	計
判読	解体	566	957	1,523
	現存	184	2,067	2,251
	計	750	3,024	3,774

表 2-5 建物輪郭面積 60m²超の建物に対して指標の閾値 0.3 で分類した混同行列

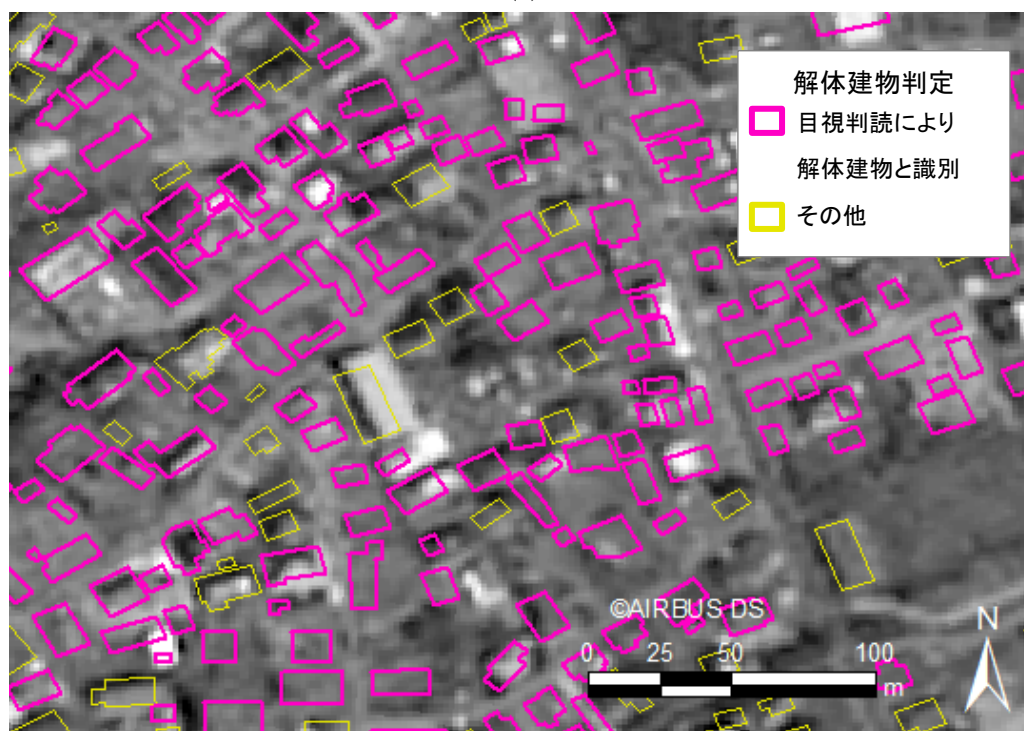
		画像解析指標による分類		
		解体	現存	計
判読	解体	2,064	2,059	4,123
	現存	692	7,152	7,844
	計	2,756	9,211	11,967

表 2-6 建物輪郭面積の違いによる評価値

	Precision	Recall	Specificity	Accuracy	F-measure
Area ≤60 m ²	0.755	0.372	0.918	0.698	0.498
Area >60 m ²	0.749	0.501	0.912	0.770	0.600



(a)



(b)

図 2-19 建物輪郭内の面積が小さく既存建物として誤分類した例

- (a) 2018年3月25日画像上に既存建物と分類した結果（一部解体建物抽出）；
- (b) 2018年3月25日のSPOT画像を背景にして目視で解体建物判定した結果.

2.3 建物データベースと被害判定の関係付け

益城町の解体建物を識別した建物データベースに被害判定結果の関連付けを行う。自治体が保有する家屋台帳には建物構造、階数、建築面積等の建物情報が記録されているため、家屋台帳の建物情報を活用することが有効と考える。しかし、家屋台帳は一般に公開されてなく、また被害情報や解体情報等との関連付けもされていない。そこで、既往の研究の被害判定結果と建物情報の調査結果を活用する。Yamazaki et al. [18]は、益城町の協力を得て被害判定結果と家屋台帳の建物情報を関連付け、建物構造や建築年代等と被害判定(全壊、大規模半壊、半壊等)の関係を分析している。その分析の過程で被害判定結果と建物情報を有するデータセットを作成した。建物情報のデータセットには、表 2-7 の 7 種類の建物構造及び 4 種類の屋根(瓦ぶき、板ぶき、陸屋根、その他)、階数、建築面積等が格納されている。

表 2-7 建物構造種類

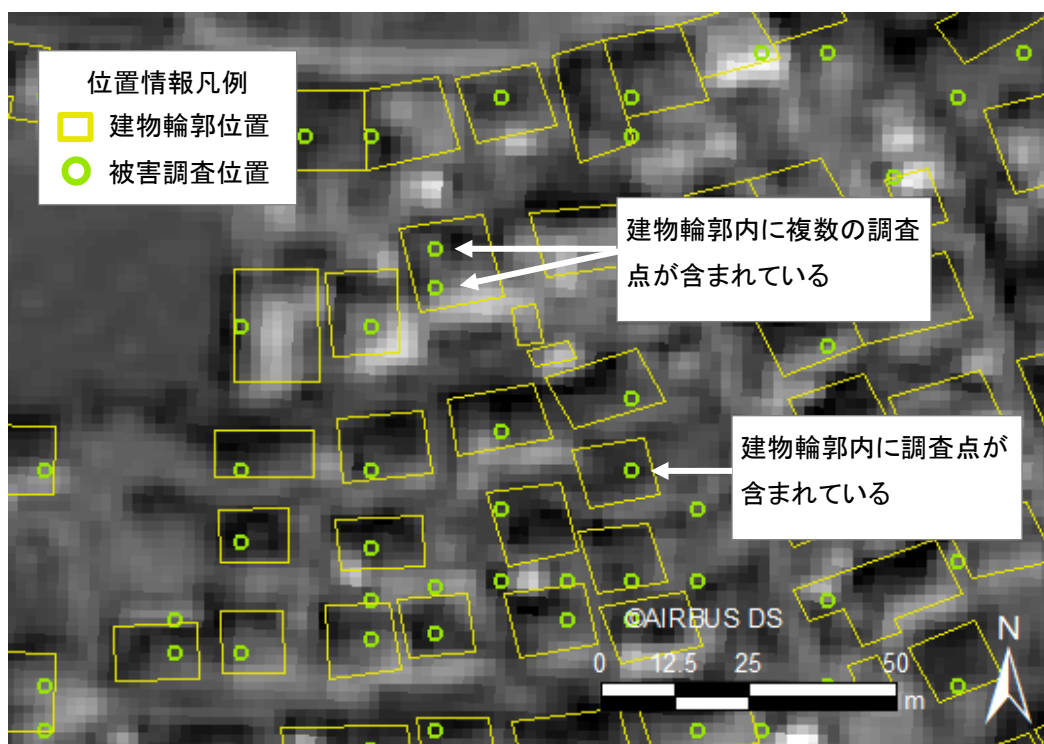
構造		略称
木造	木造	木造
非 木 造	軽量鉄骨造	LS 造
	鉄骨造	S 造
	鉄骨鉄筋コンクリート造	SRC 造
	鉄筋コンクリート造	RC 造
	コンクリートブロック造	CB 造
	その他 ^{注1}	その他

注1：物置、倉庫、カーポート等の居住用建物に当てはまりにくい構造物

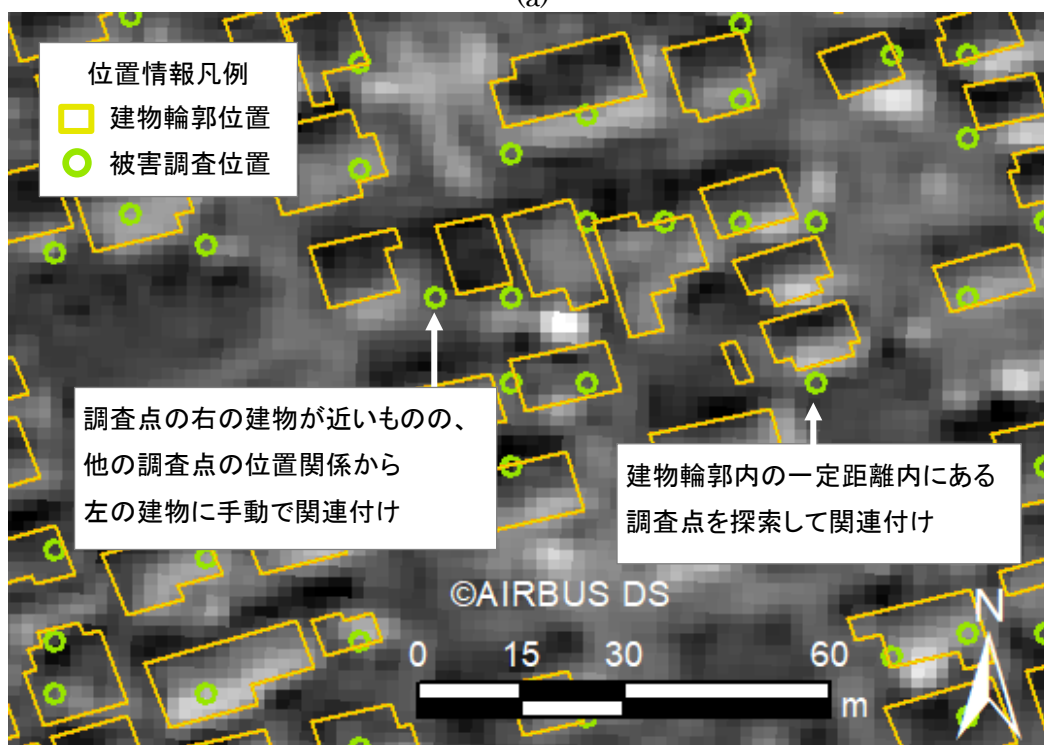
Yamazaki et al.が作成した被害建物と建物情報のデータセットには調査した時の緯度・経度が記録されている。次の段階的な関連付け条件によって、建物調査した位置と建物データベースの建物を関連付ける。

- ・建物輪郭内に被害判定の調査点の位置が含まれる場合
- ・建物輪郭内に複数点ある場合には手動による選別
- ・調査点が結びついていない建物の輪郭から一定距離内(10m)の点を探索
- ・調査点が結びついていない建物周辺を目視で確認し、隣の建物に結びついている場合手動で付け直し

上記の条件により関連付けを行った例を図 2-20 に示す。



(a)



(b)

図 2-20 被害判定結果の建物輪郭情報への関連付けの例

- (a) 建物輪郭内に調査点が含まれている (2016年3月20日 SPOT 画像に重畳) ;
- (b) 建物輪郭外に調査点がある (2016年3月20日 SPOT 画像に重畳) .

第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

この結果、被害判定と建物情報の両方とも建物データベースに関連付けできた建物は11,058件であり、残る建物5,048件は被害判定のみの関連付けまたは関連付けなしとなった。建物データベースに被害判定と建物情報を関連付けした件数を表2-8に示す。

表 2-8 建物データベースに被害判定と建物情報の関連付け件数

解体・現存識別	被害判定と建物情報	被害判定のみ	関連付けなし	計
解体建物	4,402	526	773	5,701
現存建物	6,656	19	3,730	10,405
計	11,058	545	4,503	16,106

2.4 現地写真及び Google Earth による解体建物の建物情報の調査

益城町の災害廃棄物量原単位を計算するために、全ての解体建物について、建物構造、階数、建築面積及び延床面積の情報を収集することが必要である。Yamazaki et al.が調査した建物情報を結びつけできなかった、残りの約1,299棟について他の情報を参照して建物情報を付与する必要がある。

被害情報調査結果を作成する過程で、現地調査時に被害建物の写真撮影が行われており、調査時の位置情報を記録している。建物情報が関連付けされていない解体建物1,299棟について、現地調査時の被害建物の写真を参照し、建物構造、屋根種類及び階数等の判読可能性を調査した。まず、写真判読による建物情報調査手法を事前検証するために、表2-8の建物データベースに被害判定と建物情報の関連付けされた解体建物4,402棟の中から50棟を検証用データとして選定し、被害建物を撮影している写真を見て、構造材や構造毎に特徴のある屋根形状を判別することによって、建物情報を判読した。写真判読の結果、建物構造種類（木造、S造、CB造）では92%、屋根種類（瓦、瓦以外）では94%、階数（平屋、2階）では82%の正解率を得た。誤判定した建物について、家屋台帳でS造またはCB造となっている建物を木造と誤判定、瓦以外の屋根種類である建物を瓦屋根の建物と判定していた。階数の誤判定について、家屋台帳で平屋となっている建物16棟中8棟を2階と見間違えたケースがあった。その要因として、益城町には伝統的で大きな日本家屋や屋根位置の高い小屋などがみられたこと及び被害度合いが激しく階層・高さがわかりにくかったことが挙げられる。写真判読で80%、または90%以上の精度で判読できており、より高い精度で建物情報を得る他の手段がないと判断し、現地調査時の被害建物の写真判読による建物情報を調査することにした。解体・現存識別付きGISデータベースの中で建物情報を関連付けできていない建物の位置から20mまで範囲を広げて撮影位置を探索し、対応する被害建物の写真を特定した。この方法によって、1,299棟の内、399棟の解体建物の建物情報を関連付けできた。

現地写真による建物情報の調査を経ても、まだ建物情報を関連付けできていない

第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

解体建物 900 棟が残っている。建物情報関連付け未対応解体建物について、Google Earth の熊本地震発生前の空中写真及び Google Earth をズームし、ストリートビューを目視で確認することによって、建物情報を調査する可能性を検討した。(2)で用意した 50 棟分の検証用建物を Google Earth 及びストリートビューで目視確認し、建物情報を判読した結果、(2)と同様の正解率を得た。他の方法で建物情報を得ることはできないと判断し、Google Earth 及びストリートビューを活用して、建物情報の関連付けしていない解体建物 900 棟について、構造、屋根種類及び階数を付与した。解体建物の災害廃棄物原単位を推定するのに重要なのは延床面積と建築面積である。建築面積は GIS データベースの建物輪郭内の面積から求めた。延床面積は建物輪郭内面積に階数を乗じることによって計算した。解体建物 5,701 件全てに建物情報の関連付けを行った。

2.5 解体建物の建物データベース作成結果

2.2 から 2.4 項の手順を経て、益城町の建物データベースを作成できた。益城町の全建物 16,106 件について、解体・現存の識別、被害判定の有無、建物情報の有無の関係付けと件数について整理した結果を図 2-21 に示す。

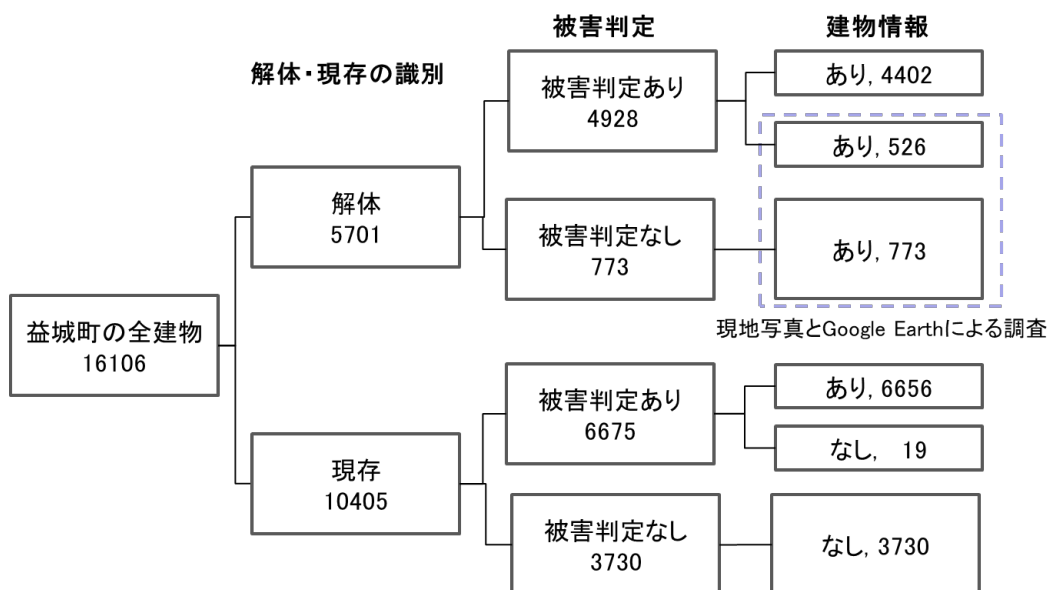


図 2-21 益城町の建物データベースの関連付けた情報と件数

2.6 本章のまとめ

益城町の解体建物の全数調査と建物データベースの作成の結果についてまとめる。益城町で熊本地震後に解体された建物の全数約 5700 棟を特定し、被害判定、建物構造、延床面積、階数、屋根種類等を含む建物データベースを作成した。この建物データベースは、OSM の住家と非住家併せて益城町の約 16,000 棟の建物の輪郭情報を素材情報とし、熊本

第2章 益城町の解体建物の全数調査と建物データベース作成

地震後に撮影された衛星画像を目視判読して、解体建物か現存建物か識別することができた。建物が解体された可能性を示す画像解析指標を作成したことによって、目視判読による解体建物と現存建物の識別を支援できた。なお、画像解析では、ソーラーパネルや壁からの反射等によって強い反射がある場合、建物の輪郭内の面積が 60m² 以下である場合に解体建物と誤判定しやすい傾向であることが分かった。

全ての解体建物を識別した建物データベースに、被害判定結果及び延床面積等の建物情報の関連付けを行った。被害判定結果と建物情報は、Yamazaki et al.のデータセットを用いて、建物被害調査の位置と建物データベースの建物輪郭位置関係によって関連付けしている。建物情報を関連付けできなかった建物について、現地調査時の写真や Google Earth を目視で確認して、建物構造と屋根種類を分類した。この建物データベースを作成したことによって、解体建物と被害の関係、解体建物の構造種類内訳、延床面積の内訳等を分析することができる。

参考文献(第2章)

- [1] 熊本県益城町：平成 28 年熊本地震による益城町災害廃棄物処理事業記録, 2018.
<https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/20788.pdf> (参照 2021 年 2 月 6 日)
- [2] Ji, S., Wei, S., Lu, M.: Fully Convolutional Networks for Multisource Building Extraction from an Open Aerial and Satellite Imagery Data Set. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 57, No.1, pp.574–586, 2018.
- [3] Chen, Q., Wang, L., Wu, Y., Wu, G., Guo, Z., Waslander, S.L.: Aerial imagery for roof segmentation: A large-scale dataset towards automatic mapping of buildings. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 147, pp.42–55, 2019.
- [4] Huang, B., Lu, K., Audebert, N., Khaleel, A., Tarabalka, Y., Malof, J., Boulch, A., Le Saux, B., Collins, L., Bradbury, K. et al.: Large-scale semantic classification: Outcome of the first year of Inria aerial image labeling benchmark. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Valencia, Spain, pp. 22–27, July 2018.
- [5] Huang, Z., Cheng, G., Wang, H., Li, H., Shi, L., Pan, C.: Building extraction from multi-source remote sensing images via deep deconvolution neural networks. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Beijing, China, pp.1835–1838, July 2016.
- [6] Li, W., He, C., Fang, J., Zheng, J., Fu, H., Yu, L.: Semantic segmentation-based building footprint extraction using Very High-Resolution satellite images and multi-source GIS data. *Remote Sensing*. Vol. 11, No. 403, pp.1-19, 2019.
- [7] Yuan, J., Cheryadat, A.M.: Learning to count buildings in diverse aerial scenes. In *Proceedings of the 22nd ACM Sigspatial International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, Dallas, TX, USA, pp. 271–280, November 2014.
- [8] Du, S., Zhang, F., Zhang, X.: Semantic classification of urban buildings combining VHR image and GIS data: An improved random forest approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 105, pp.107–119, 2015.
- [9] Demir, I., Koperski, K., Lindenbaum, D., Pang, K., Huan, J., Basu, S., Hughes, F., Tuia, D., Raskar, R.: DeepGlobe 2018: A Challenge to Parse the Earth through Satellite Images. In *Proceedings of the IEEE CVPR workshops*, Salt Lake City, UT, USA, pp.172–181, July 2018.
- [10] Hamaguchi, R., Hikosaka, S.: Building detection from satellite imagery using ensemble of size-specific detectors. In *Proceedings of the IEEE CVPR workshops*, Salt Lake City, UT, USA, pp. 187–191., July 2018.
- [11] 国土地理院：基盤地図情報。
https://fgd.gsi.go.jp/download/ref_kihon.html (参照 2021 年 2 月 6 日)
- [12] Google マップ/Google Earth.

<https://www.google.co.jp/maps/> (参照 2019 年 7 月 19 日).

[13] OpenStreetMap Static Map.

<http://staticmap.openstreetmap.de/> (参照 2018 年 7 月 22 日).

[14] 総務省：平成 30 年住宅・土地統計調査 住宅及び世帯に関する基本集計, 2018.

<https://www.e-stat.go.jp/stat-search?page=1&toukei=00200522> (参照 2021 年 2 月 6 日)

[15] 国土地理院：基盤地図情報 数値標高モデル.

<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem> (参照 2018 年 7 月 22 日).

[16] Fawcett, T.: An. Introduction to ROC Analysis, Pattern Recognition Letters, Vol.27, pp. 861–874, 2006.

[17] Bradley, A.: The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. Pattern Recognition, Vol.30, No.7, pp.1145–1159, 1997

[18] Yamazaki, F., Suto, T., Liu, W., Matsuoka, M., K. Horie, K. Kawabe, K. Torisawa, Inoguchi, M.: Development of fragility curves of Japanese buildings based on the 2016 Kumamoto earthquake. In Proceedings of the PCEE, Auckland, New Zealand, 228, pp.1-8, April 2019.

第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出

3.1 はじめに

本章では、災害廃棄物発生量推計式の係数の一つである、災害廃棄物量原単位を算出する。図 3-1 に本研究全体の中の第 3 章の調査研究対象を示す。第 2 章で益城町の解体建物を全数調査し建物データベースを作成した。この建物データベースを使えば、解体建物の棟数、構造、階数、延床面積及び屋根種類等を得ることができる。災害廃棄物量原単位を算出するためには、2016 年熊本地震後、益城町が廃棄物を処理する際に記録していた災害廃棄物の実績データを収集し、解体建物に由来する災害廃棄物処理量を整理することが必要である。これらの情報を求め、図 3-2 に示すように、災害廃棄物処理量（実績）、解体建物の延床面積と延床面積当り災害廃棄物量原単位の関係が成り立つことから、延床面積当り災害廃棄物量原単位を推定することが目的である。

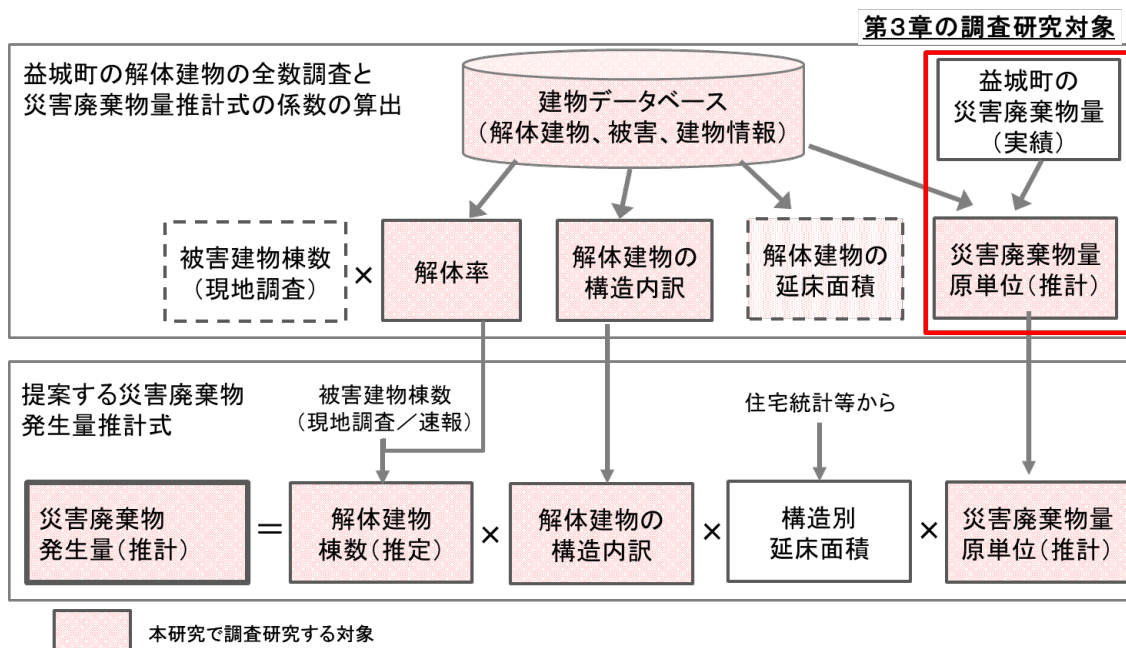


図 3-1 第 3 章の調査研究対象

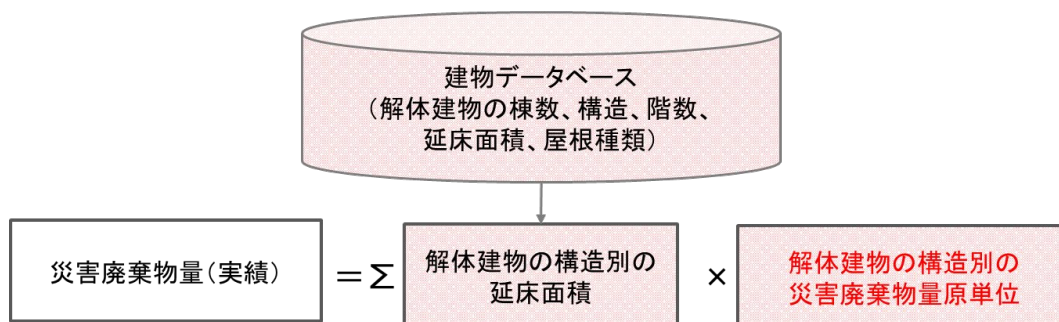


図 3-2 災害廃棄物量と災害廃棄物量原単位の関係

3.2 モデル解体調査による災害廃棄物量原単位

建物1棟から排出される廃棄物量については、年代や地域で原単位が異なる可能性も示唆されており、過去にいくつかの地域や災害後にモデル解体調査が行われている。モデル解体調査は次のような流れで進められる。

- ・災害後、自治体や住人等から協力を得た上で調査対象家屋の決定
- ・解体業者の日程に合わせて計測準備
- ・解体業者による解体期間に合わせて運搬時にトラックスケールで計測

熊本地震後にも、モデル解体調査によって解体建物1棟から排出される災害廃棄物量及び延床面積当りの原単位が調査された。熊本地震後の建物解体時の作業の様子を写した写真を図3-3に示す。



(a)



(b)

図 3-3 損壊建物の解体作業の様子

- (a) 木造建物解体（出典：平成 28 年熊本地震における災害廃棄物処理の記録^[1]）；
- (b) 非木造家屋解体（著者撮影）。

モデル解体調査の問題点について述べる。モデル解体調査を行う前に、建物の所有者と解体業者との調整を要する。解体作業自体にも非常に長い時間がかかるため、排出される

第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出

廃棄物量を計測するのに日数がかかる。多くの労力と時間を要することから、地震発生後の短期間に統計的な分析を行えるほどの調査を行うことは難しい。そのため、図1-5のグラフに示したように、モデル解体調査の解体建物棟数は少なく、熊本地震モデル解体調査で計測されたのは4棟分の木造建物の災害廃棄物量原単位である。橋本らの調査数は46棟と比較的多いものの、震災による損壊建物の解体建物の調査ではなく、関東と関西の解体工事の建物が対象であり、厳密には熊本地震が発生した場所とは異なる地点の調査結果である。モデル解体調査の災害廃棄物量原単位は1棟当りでみれば正確な値であるものの、解体建物棟数が少なく、調査値がばらついていると、その平均値は誤差を含んでしまう。自治体レベルの解体建物の災害廃棄物量原単位の平均値として扱ってよいかは検討の余地がある。そこで、益城町の全解体建物の建物情報が格納された建物データベースから解体建物の構造別に延床面積を計算し、益城町の災害廃棄物の総量を調査し、平均値となる災害廃棄物量原単位を求めていく。

3.3 益城町の災害廃棄物量

益城町の全解体建物を対象として、災害廃棄物量原単位（推計）を推定するために、益城町全体の解体建物に由来して処理した災害廃棄物量の実績データを調査する。

3.3.1 災害廃棄物の収集先

災害廃棄物は、自治体毎に処理されるが、仮置場や処分場は規模によるが、通常1箇所では足りず、複数個所に分散されることや県外等の運搬されることがある。そのため、収集された場所を知ることから始める。益城町で発生した災害廃棄物の多くは、図3-4に示す、一次仮置場である旧益城町小学校と二次仮置場であるテクノリサーチパークに搬入されている。一部の災害廃棄物は、直接、産業廃棄物処理施設に搬入されていて、旧益城町小学校とテクノリサーチパークと合わせると益城町の全体の災害廃棄物処理量になる。



図 3-4 益城町の災害廃棄物の仮置場と処分場

3.3.2 片付けごみと解体建物に由来する災害廃棄物

益城町の全ての解体建物から発生した災害廃棄物の情報を収集するに当たって、災害後に生じる災害廃棄物の構成について説明する。環境省の災害廃棄物対策指針²⁾によると、災害により発生する災害廃棄物は、損壊家屋から排出される片付けごみ及び損壊建物の解体等に伴い排出される廃棄物から構成されると述べられている。片付けごみとは、損壊した家電、家具、布団等である。災害廃棄物で多くを占めているのは、家屋等建物の解体等に伴い排出される災害廃棄物であり、その量を把握することが重要である。災害種類によって、建物以外の廃棄物が混じる場合がある。特に、津波災害の場合、津波堆積物や海産物などの廃棄物も混じることがあり、その量も大きい。東日本大震災では津波堆積物が大量に発生したが、熊本地震は揺れによる被害であるため、被災建物から排出される片付けごみ及び損壊建物の解体等に伴い排出される廃棄物の2種類で構成される。損壊建物であっても、企業が保有する工場や倉庫等から排出される廃棄物、鉄道や高速道路等の構造物から排出される災害廃棄物等は、それぞれの事業者が産業廃棄物として処理を行い、自治体に取り扱わないため、本研究で扱う災害廃棄物から外れる。

3.3.3 解体建物から排出された災害廃棄物量

益城町では、月毎の災害廃棄物処理量（実績）を記録しており、本研究に使用する目的で提供いただいた。災害廃棄物は、片付けごみ及び解体建物から排出される廃棄物で構成

第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出

されると述べた。片付けごみは、損壊した家電、家具、布団等であり、解体建物から生じる廃棄物量に比べれば片付けごみの量は少ないと予想されるものの、その量を把握し、災害廃棄物量原単位（推計）の計算の対象から外しておく。益城町が記録していた災害廃棄物は、組成別に20種類以上に分類されている。家電、家具、布団等の片付けごみ及び倒木による木くずや庭等にあったと推測される石（以下、片付けごみ・倒木等）は解体建物に由来する廃棄物と区別する。片付けごみ・倒木等を除いて、可能な限り解体建物から排出される災害廃棄物に絞り込みを行い、木くず、コンクリート、瓦屋根材等の組成別の災害廃棄物処理量を集計した。約2年間に処理された片付けごみ・倒木等の量は約1.2万tであり、この量を差し引くと、災害廃棄物処理量は約32.5万tであった。求めた災害廃棄物量は、仮置場といずれの処分場に搬入された災害廃棄物量の全てが含まれているため、益城町の全ての解体建物から排出された災害廃棄物量に等しいと考えてよい。益城町の解体建物の月毎の災害廃棄物処理量（実績）を図3-5に示す。また、組成別災害廃棄物処理量（実績）の累積値を表3-1に示す。

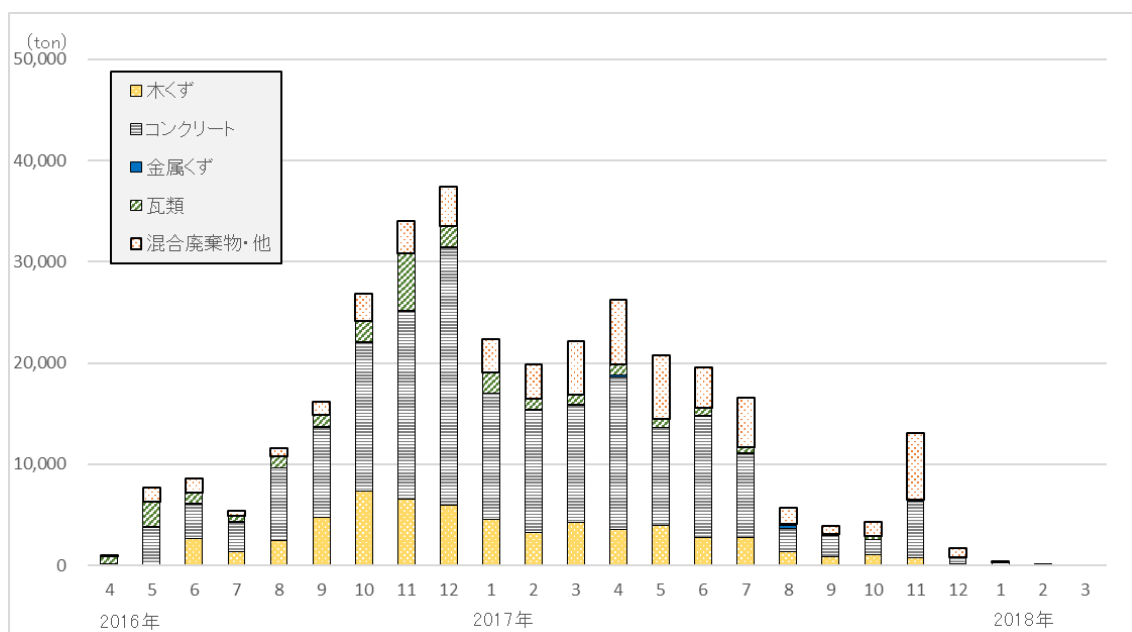


図 3-5 益城町の解体建物による月毎の災害廃棄物処理量（実績）

表 3-1 益城町の災害廃棄物処理事業完了時の組成別災害廃棄物処理量（実績）

No.	組成	災害廃棄物処理量(t)
1	木くず	60,228
2	コンクリートがら	178,503
3	金属くず	1,632
4	瓦類	24,850
5	混合廃棄物・その他	60,185
	合計	325,398

3.4 災害廃棄物量原単位の算出式

既存の災害廃棄物量推計式は、式(1-1)に示したように、被害建物棟数に対して災害廃棄物量原単位（推計）を乗じて計算する式である。第1章で示した表1-3の被害建物1棟当りの災害廃棄物量原単位（推計）は、平山らが式(1-1)に基づいて東日本大震災後に宮城県と岩手県の20市町村の災害廃棄物量を被説明変数、全壊棟数と一部損壊を含む半壊棟数を説明変数とし、全壊建物と半壊建物の解体比率が100対20という制約を設けて、重回帰モデル(n=20)によって、係数となる災害廃棄物量原単位を算出した結果である。その推計値と式(1-1)が、環境省の災害廃棄物対策指針【技14-2】災害廃棄物等の要処理量の推計方法^④に掲載されている。

第1章で問題点を挙げたように、全壊建物と半壊建物のそれぞれ解体率や解体建物の構造内訳が確かめられていないままに算出された災害廃棄物量原単位であり、不確定な要素が残っている。しかし、本研究では、益城町の解体建物に由来する災害廃棄物処理量（実績）も集計し、表3-1にその結果を示した。また、第2章で益城町の全ての解体建物を識別し、建物データベースを作成したことによって、表3-2の構造別の解体建物棟数と延床面積を得られたことから、解体建物棟数と延床面積当りの災害廃棄物量原単位を求めることができる。

表 3-2 益城町の構造別解体建物の棟数と延床面積

	棟数	延床面積 (m ²)
木造	5,030	514,229
LS造	238	21,573
S造	95	14,237
SRC造	0	0
RC造	16	10,921
CB造	23	2,049
その他	299	17,467
計	5,701	580,475

第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出

構造別の解体建物棟数と災害廃棄物処理量（実績）を用いて、解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位（推計）を算出する式は、式（3-1）となる。

$$AW = \sum AX_i \times Aa_i \quad \dots \text{式 (3-1)}$$

ここで、 AW ：災害廃棄物処理量（実績）（t）

AX_i ：建物構造別の解体建物棟数（実績）

Aa_i ：建物構造別の解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位（t/棟）

i ：構造の種別（木造、軽量鉄骨造、コンクリート造等）

第3章のはじめに述べたように、建物データベースを作成したことによって、解体建物の構造別延床面積も分かることから、災害廃棄物処理量、解体建物の構造別延床面積と構造別の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）には、図3-2の関係が成り立ち、数式で表現すると、式（3-2）となる。

$$BW = \sum BM_i \times Bb_i \quad \dots \text{式 (3-2)}$$

ここで、 BW ：災害廃棄物処理量（実績）（t）

BM_i ：建物構造別の解体建物延床（または建築）面積（ m^2 ）

Bb_i ：建物構造別の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）（t/ m^2 ）

i ：建物構造の種別（木造、軽量鉄骨造、コンクリート造等）

更に、表3-1の5種類の組成（木くず、コンクリートがら、金属くず、瓦類、混合廃棄物・その他）別に災害廃棄物処理量（実績）も分かったので、組成の種別を分けて関係式を作成する。組成別災害廃棄物処理量が建物構造別・組成別の延床面積と災害廃棄物量原単位（推計）の乗算に一致する関係から、算出式は式（3-3）とすることができる。

$$BW_j = \sum (BM_{ij} \times Bb_{ij}) \quad \dots \text{式 (3-3)}$$

ここで、 BW_j ：組成別災害廃棄物処理量（実績）（t）

BM_{ij} ：建物構造別の解体建物延床（または建築）面積（ m^2 ）

Bb_{ij} ：建物構造別・組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）（t/ m^2 ）

i ：建物構造の種別（木造、軽量鉄骨造、コンクリート造等）

j ：組成の種別（木くず、コンクリートがら等）

3.5 災害廃棄物量原単位の算出

3.4項に示した災害廃棄物量原単位（推計）の算出式によって、災害廃棄物量原単位を推計していく。

3.5.1 解体建物1棟当り災害廃棄物量原単位の算出

解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位（推計）を算出する式は、式（3-1）であるが、建物構造数（ i ）を設定する必要がある。はじめに、建物構造は分けず1つ（ $i = 1$ ）に設定して計算することとした。式（3-1）は式（3-4）となる。

$$AW = AX_1 \times Aa_1 \quad \dots \text{式 (3-4)}$$

ここで、 AW ：災害廃棄物処理量（実績）（t）

AX_1 ：解体建物棟数（実績）

Aa_1 ：解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位（推計）（t/棟）

表3-1の災害廃棄物処理量（実績）の合計値と解体建物棟数（実績）である5,701棟を関係式（3-4）に適用した結果、解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位（推計） Aa_1 は57.1（t/棟）となった。解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位（推計）は、木造と非木造、特に、重い組成であるコンクリートを多く使っているRC造やCB造も数%程度混在している。そこで、RC造/CB造の災害廃棄物量原単位（推計）は、熊本地震モデル解体調査のRC造ビル3棟の災害廃棄物量原単位（モデル解体）の用いる条件に設定して、比較的軽い構造の災害廃棄物量原単位を算出することを検討した。木造、LS造、S造及びその他（以下、これらの構造を木造/LS造/S造/他という）とRC造/CB造の2種類の構造（ $i = 2$ ）に分けて、式（3-5）により解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位を算出することとした。

$$AW = AX_1 \times Aa_1 + AX_2 \times Aa_2 \quad \dots \text{式 (3-5)}$$

ここで、 AW ：災害廃棄物処理量（実績）（t）

AX_1 ：木造/LS造/S造/他の解体建物棟数

Aa_1 ：木造/LS造/S造/他の解体建物1棟当りの
災害廃棄物量原単位（推計）（t/棟）

AX_2 ：RC造/CB造の解体建物棟数（実績）

Aa_2 ：RC造/CB造の解体建物1棟当りの
災害廃棄物量原単位（モデル解体）（t/棟）

熊本地震モデル解体調査によるビル3棟の災害廃棄物量原単位の平均値は1.17（t/m²）であり、RC造/CB造の解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位（モデル解体） Aa_2 に適用するためには、1棟当りの延床面積を設定する必要がある。益城町の建物データベースから、RC造/CB造の解体建物棟数が39棟であり、RC造/CB造解体建物の平均延床面積は333m²/棟である。災害廃棄物量原単位（モデル解体）1.17（t/m²）に平均延床面積333（m²/

棟) を乗じて、RC造/CB造の解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位 $Aa_2=389$ (t/棟) と設定した。益城町全体の木造/LS造/S造/他の解体建物棟数が5,662棟あることから、式(3-5)の関係から、木造/LS造/S造/他の解体建物1棟当りの解体建物由来の災害廃棄物量原単位 $Aa_1=54.8$ (t/棟) を得た。

3.5.2 延床面積当り組成別災害廃棄物量原単位の推計

建物構造別・組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位(推計)を算出する式(3-3)について、表3-1の5種類の組成種類別($j=1\sim 5$)に関係式を成立させて、建物構造別・組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位(推計)を求めていく。また、3.5.1と同様に、式(3-3)において、建物構造数(i)分の式を設定する必要があるが、表3-1の組成別災害廃棄物処理量は、建物構造別に集計されていないため、複数の変数を設定することができない。そこで、解体建物の構造種類で内訳の大きい構造に絞り込んで、延床面積当り災害廃棄物量原単位を求めていくこととする。図3-6は構造別、更に木造については瓦屋根か否かによって、延床面積の割合を図の面積で表現したものである。組成別の災害廃棄物処理量の割合が大きい、木くず、コンクリートがら、瓦について、それらの組成の廃棄物を排出する割合が多いと推測される建物構造の延床面積当り災害廃棄物量原単位(推計)を求めていくこととする。

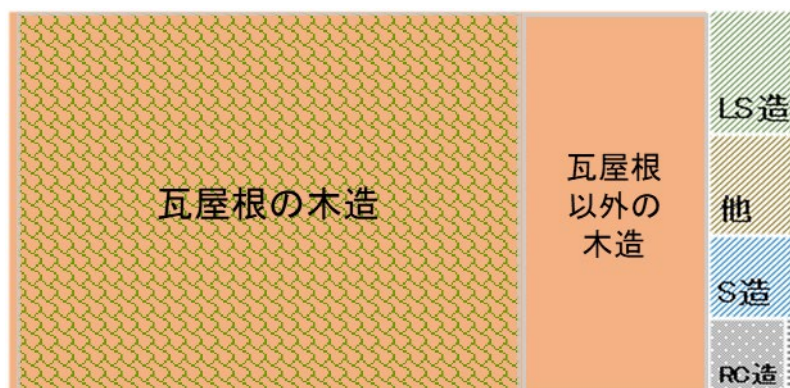


図 3-6 解体建物の構造別の延床面積内訳

構造内訳の少ない構造の災害廃棄物量原単位は算出の対象とせず、表3-3に示す熊本地震モデル解体による災害廃棄物量原単位の非木造(RC造)の値を設定する。

表 3-3 熊本地震モデル解体調査による組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位

組成	木造	非木造 (RC 造)
木くず	0.090	0.011
コンクリート	0.278	1.095
金属くず	0.006	0.039
混合廃棄物・他	0.142 ^{注1}	0.024
計	0.516	1.170

注1：熊本地震モデル解体調査の組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位では瓦類は分類されてなく混合廃棄物・他に含まれる。

■木くず ($j = 1$) の災害廃棄物量原単位の算出

表 3-3 から分かるように、木くずは、木造建物から多く発生する。熊本地震モデル解体調査で解体された非木造建物の構造種類は RC 造だけであるが、一般に RC 造に限らず LS 造、S 造、CB 造、その他構造の建物といった非木造建物は、主たる構造材料に木材を使っていないことから、非木造建物の木くずの量は木造建物に比べて少ない。更に、益城町の解体建物の非木造の割合は、棟数で約 12%、延床面積で約 18%である。これらのことから、非木造建物が寄与する木くず量は少ないと考える。木造と非木造の 2 種類の構造 ($i = 1, 2$) に分けると、式 (3-6) が成立すると考え、式 (3-7) により解体建物 1 棟当りの災害廃棄物量原単位を算出する。

$$BW_1 = BM_{11} \times Bb_{11} + BM_{21} \times Bb_{21} \quad \dots \text{式 (3-6)}$$

ここで、 BW_1 ：組成別災害廃棄物実処理量 (t)

BM_{11} ：木造の解体建物の延床 (または建築) 面積 (m^2)

Bb_{11} ：木造の解体建物の木くず延床面積当り災害廃棄物量原単位 (t/m^2)

BM_{21} ：非木造の解体建物の延床 (または建築) 面積 (m^2)

Bb_{21} ：非木造の解体建物の木くずの延床面積当り災害廃棄物量原単位 (t/m^2)

$$Bb_{11} = \frac{BW_1 - BM_{21} \times Bb_{21}}{BM_{11}} \quad \dots \text{式 (3-7)}$$

非木造の解体建物の木くずの延床面積当り災害廃棄物量原単位 Bb_{21} は、表 3-3 の熊本地震モデル解体調査の非木造の木くずの原単位 $0.011 (t/m^2)$ を適用する。式 (3-7) に解体建物の木造の延床面積と非木造建物延床面積平均を入力して、木造の解体建物の木くずの延床面積当り災害廃棄物量原単位 Bb_{11} を計算した結果、 $0.115 (t/m^2)$ となった。

■コンクリート ($j = 2$) の災害廃棄物量原単位の算出

木造、LS 造及び S 造は主に基礎部分にコンクリートが使われている。RC 造/CB 造は柱及び壁等にコンクリート、またはブロックが使われており、木造、LS 造、S 造、その他の

第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出

建物（以下、木造/LS造/S造/他）に比較して多くコンクリート系資材が使われていると考えてよい。そのため、木造と非木造で構造種類を分けず、木造/LS造/S造/他とRC造/CB造の2種類の建物構造（ $i = 1, 2$ ）に分けて式（3-8）が成立すると考え、解体建物棟数が多い木造/LS造/S造/他のコンクリートの延床面積当り災害廃棄物量原単位を式（3-9）により算出する。

$$BW_2 = BM_{12} \times Bb_{12} + BM_{22} \times Bb_{22} \quad \dots \text{式 (3-8)}$$

ここで、 BW_2 ：コンクリートがらの災害廃棄物発生量（t）

BM_{12} ：木造/LS造/S造/他の解体建物の延床面積（ m^2 ）

Bb_{12} ：木造/LS造/S造/他の解体建物のコンクリートの延床面積当り災害廃棄物量原単位（ t/m^2 ）

BM_{22} ：RC造/CB造の解体建物の延床面積（ m^2 ）

Bb_{22} ：RC造/CB造の解体建物のコンクリートがらの延床面積当り災害廃棄物量原単位（ t/m^2 ）

$$Bb_{12} = \frac{BW_2 - BM_{22} \times Bb_{22}}{BM_{12}} \quad \dots \text{式 (3-9)}$$

RC造/CB造の解体建物の災害廃棄物量原単位 Bb_{22} は、表3-3の熊本地震モデル解体調査の非木造のコンクリートの原単位1.095（ t/m^2 ）を用いる。式（3-9）に、木造/LS造/S造/他の解体建物の延床面積、RC造/CB造の解体建物の延床面積、コンクリートがらの災害廃棄物発生量を入力し、木造/LS造/S造/他の解体建物のコンクリートの延床面積当り災害廃棄物量原単位 Bb_{12} を計算した結果、0.289（ t/m^2 ）となった。

■金属（ $j = 3$ ）の災害廃棄物量原単位の算出

表3-3の熊本地震モデル解体調査の金属くずの災害廃棄物量原単位は、木造0.006（ t/m^2 ）、非木造0.039（ t/m^2 ）である。木造建物は主要な構造材に鉄骨や鉄筋等を使っていないことから、木造の金属の延床面積当り災害廃棄物量原単位は小さくなるを考える。木造と非木造に分けて、非木造について表3-3の熊本地震モデル解体の災害廃棄物量原単位の非木造の金属くずの値を使って、木造の災害廃棄物量原単位を算出することも試みた。しかし、非木造建物の延床面積の合計に、表3-3の非木造の金属くずの災害廃棄物量原単位を乗算した数値は、実際に発生した益城町全体の金属くずの災害廃棄物処理量を上回るという不整合が生じた。木造と非木造に分けて金属の災害廃棄物量原単位を求めることはできないと考え、解体建物の多くは木造建物であること、並びに益城町の災害廃棄物発生量の合計に対して金属くずの割合は0.5%であり、金属の災害廃棄物量原単位（推計）は、災害廃棄物発生量の推計に与える影響は少ないと考え、構造別に分けずに金属くずの総量と全解体建物の延床面積との関係式（3-10）として、式（3-11）から全解体建物の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）を算出する。

第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出

$$BW_3 = BM_{13} \times Bb_{13} \quad \dots \text{式 (3-10)}$$

ここで、 BW_3 ：金属くず災害廃棄物実処理量 (t)

BM_{13} ：全解体建物の延床面積 (m²)

Bb_{13} ：全解体建物の金属の延床面積当り災害廃棄物量原単位 (t/m²)

$$Bb_{13} = \frac{BW_3}{BM_{13}} \quad \dots \text{式 (3-11)}$$

全解体建物の金属くず延床面積当り解体建物由来の災害廃棄物量原単位 Bb_{13} は 0.0028 (t/m²) となった。

■瓦 ($j = 4$) の災害廃棄物量原単位の算出

瓦が発生する建物は、瓦屋根の建物に限られると考えてよい。解体建物から排出される瓦の重量は、延床面積でなく建築面積に比例すると考え、建物データベースから瓦屋根の解体建物の建築面積は 404,597 (m²) と求めた。式 (3-12) の関係から式 (3-13) を導き、瓦屋根の解体建物の建築面積と瓦の災害廃棄物発生量を入力して瓦の建築面積当り災害廃棄物量原単位を算出する。

$$BW_4 = BM_{14} \times Bb_{14} \quad \dots \text{式 (3-12)}$$

ここで、 BW_4 ：瓦の災害廃棄物実処理量 (t)

BM_{14} ：瓦屋根の解体建物の建築面積 (m²)

Bb_{14} ：瓦屋根の解体建物の建築面積当り解体建物由来の災害廃棄物量原単位 (t/m²)

$$Bb_{14} = \frac{BW_4}{BM_{14}} \quad \dots \text{式 (3-13)}$$

計算した結果、瓦の建築面積当り災害廃棄物量原単位 Bb_{14} は 0.061 (t/m²) となった。

■混合廃棄物・その他 ($j = 5$) の災害廃棄物量原単位の算出

混合廃棄物・その他の組成は、解体時に分類しにくい廃棄物や残渣であり、構造による排出量の多寡も推察しにくいことから、構造別に分けずに式 (3-14) の関係から災害廃棄物量原単位を求める。全解体建物の延床面積と混合廃棄物・その他の災害廃棄物発生量を式 (3-15) に入力し、混合廃棄物・その他の延床面積当り災害廃棄物量原単位を算出する。

$$BW_5 = BM_{15} \times Bb_{15} \quad \dots \text{式 (3-14)}$$

ここで、 BW_5 ：混合廃棄物・その他災害廃棄物実処理量 (t)

BM_{15} ：全解体建物の延床面積 (m²)

Bb_{15} ：全解体建物の混合廃棄物・その他の延床面積当り災害廃棄物量原単位 (t/m²)

第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出

$$Bb_{15} = \frac{BW_5}{BM_{15}} \quad \dots \text{式 (3-15)}$$

全解体建物の混合廃棄物・その他の延床面積当り災害廃棄物量原単位 Bb_{15} は0.104 (t/m²)となった。

■木造建物の組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）一覧

算出した木造建物の組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）の一覧を表 3-4 にまとめる。

表 3-4 益城町の木造建物の組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位

組成	木造・瓦屋根 (t/m ²)	木造・瓦屋根以外 (t/m ²)
木くず	0.115	0.115
コンクリート	0.289	0.289
金属くず	0.003	0.003
瓦類 ^{注1}	0.061	—
混合廃棄物・他	0.104	0.104
計	0.573	0.511

注1：延床面積ではなく建築面積であることに注意。

3.6 本研究の災害廃棄物量原単位とモデル解体調査結果の比較と考察

ここまでの結果により、解体建物1棟当り災害廃棄物量原単位（推計）と主に木造建物の組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）を算出することができた。算出した災害廃棄物量原単位（推定）について、既往の災害廃棄物量原単位（モデル解体調査）と比較しつつ、第1章で提案した災害廃棄物量を推計式の災害廃棄物量原単位（推定）として扱うことが妥当か考察していく。

解体建物1棟当りの災害廃棄物量原単位（推計）について、構造を分けず棟数で平均した場合に57.1 (t/棟)、木造/LS造/S造/他の建物を分けた場合には54.8 (t/棟)となった。本研究で算出した災害廃棄物量原単位と過去のモデル解体調査により計測された災害廃棄物量原単位を図3-7に示す。熊本地震のモデル解体調査の対象の木造家屋4棟の災害廃棄物量原単位（モデル解体）の平均値は52.5 (t/棟)、最大値と最小値は83.0 (t/棟)と39.1 (t/棟)である。本研究の木造/LS造/S造/他の建物の解体建物1棟当り災害廃棄物量原単位（推計）と熊本地震モデル解体調査の平均値は近い値であり、最大・最小値の区間内でもある。延床面積当り災害廃棄物量原単位で比べてみても、本研究の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）は、瓦屋根の木造建物で0.57 (t/m²)、瓦屋根以外の木造建物で0.51 (t/m²)となった。延床面積当り災害廃棄物量原単位（モデル解体）が0.52 (t/m²)、最

大値と最小値が $0.81 \text{ (t/m}^2\text{)}$ と $0.38 \text{ (t/m}^2\text{)}$ である。延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）と災害廃棄物量原単位（モデル解体調査）の平均値を比べると、近い値である。しかし、災害廃棄物量原単位（モデル解体調査）の最大・最小値の差が大きく、離散的な計測値の平均であることに対して、本研究の算出方法は、解体建物の構造別延床面積を算出して益城町全体の災害廃棄物処理量の平均値を計算していることから、木造建物については、序章で提案した災害廃棄物量推計式に用いる解体建物の災害廃棄物量原単位（推定）として扱うことは妥当と考える。

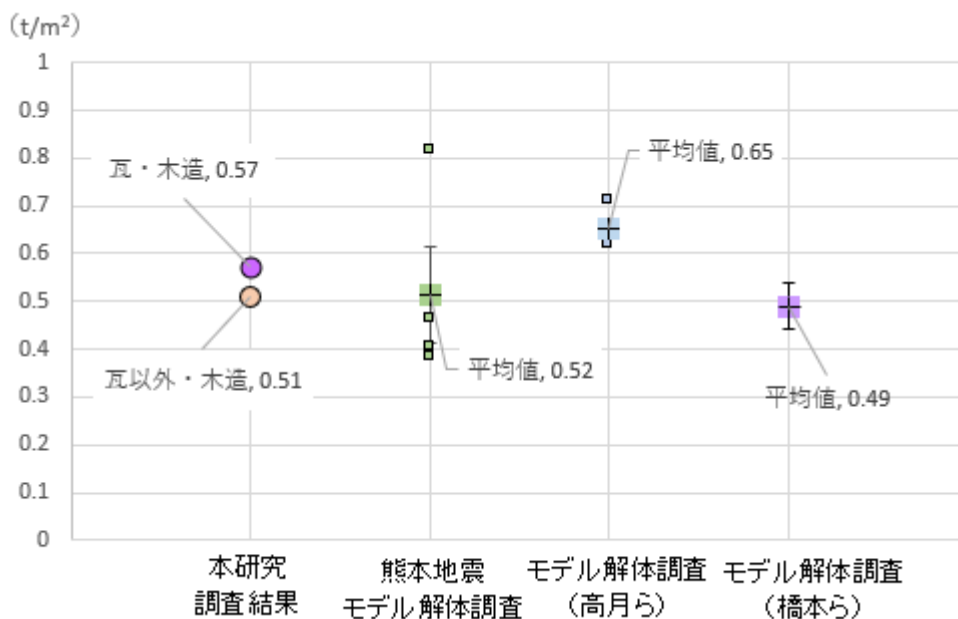


図 3-7 本研究とモデル解体調査の災害廃棄物量原単位の比較

次に、組成別の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）を考察していく。発生割合の多い組成順序は、コンクリートがら、木くず、混合廃棄物・その他、瓦、金属くずとなった。熊本地震モデル解体調査では、瓦は不燃系廃棄物にまとめられていることから、本研究の分類でも混合廃棄物・その他及び瓦を一つの項目にまとめ、組成割合が多い順序に並べ直すと、コンクリートがら、混合廃棄物・その他、木くず、金属くずの順であり、熊本地震モデル解体調査の割合順序と同じであった。

木造建物の主要な組成である、木くず、コンクリートがら、瓦について、推計値を考察してみる。木くずの延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）について、延床面積当り災害廃棄物量原単位（モデル解体調査）と比べる。延床面積当り災害廃棄物量原単位（モデル解体調査）の木くずの平均値は $0.090 \text{ (t/m}^2\text{)}$ 、最大値と最小値が $0.120 \text{ (t/m}^2\text{)}$ と $0.069 \text{ (t/m}^2\text{)}$ である。本研究で推計した木くずの延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）は $0.115 \text{ (t/m}^2\text{)}$ であり、モデル解体調査の最大・最小値の区間内であるものの、モデル解体調査の平均値より $0.025 \text{ (t/m}^2\text{)}$ 大きい。益城町に建築年代の古い建物が多く、木材の使用量が多かったことも予想されるが、本研究でその差の要因を究明することはできていない。

第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出

コンクリートについて、木造/LS造/S造/他の建物の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）は $0.29 \text{ (t/m}^2\text{)}$ となった。モデル解体調査では、その平均値は $0.28 \text{ (t/m}^2\text{)}$ 、最大値と最小値は $0.51 \text{ (t/m}^2\text{)}$ と $0.17 \text{ (t/m}^2\text{)}$ である。本研究の延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）とモデル解体調査の平均値は非常に近い値である。益城町の解体建物の内、最も多い構造は木造で約90%であり、鉄骨・軽量鉄骨造、その他の構造の順である。式(3-3)において、木造/LS造/S造/他と1つの構造にまとめて算出したものの、モデル解体調査結果の平均値とほぼ同じ値であることから、木造建物のコンクリートの延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）として妥当な値を得たと考える。

瓦について、モデル解体調査結果では瓦だけを分けて、災害廃棄物量原単位を算出していない。代わりに、全日本瓦工事業連盟等が発行している瓦屋根標準設計・施工ガイドライン^[4]より 1m^2 当りの瓦量を計算した結果と比較した。屋根面積 1m^2 当りの瓦の重量は瓦の種類による違いがあるが、約 $0.04\sim 0.05 \text{ (t/m}^2\text{)}$ と計算できた。屋根には傾きがあるので建築面積よりも屋根面積は大きくなり、仮に25度の傾きとすれば屋根面積は建物面積の約1.1倍となる。加えて軒部分で面積が広がるため、屋根面積は建築面積の約1.2倍かそれ以上であることから、机上計算で概ね $0.6 \text{ (t/m}^2\text{)}$ となる。本研究で求めた、瓦の災害廃棄物量原単位（推計）が $0.06 \text{ (t/m}^2\text{)}$ であり、瓦屋根標準設計・施工ガイドラインの机上計算とほぼ同じ値である。

3.7 本章のまとめ

災害廃棄物量原単位の算出結果についてまとめる。片付けごみ・倒木等を除いた、益城町の災害廃棄物処理期間の全ての災害廃棄物処理量（実績）と組成別災害廃棄物処理量（実績）を調査した。第2章で作成した、益城町の解体建物の建物データベースは、解体建物5,701棟全ての構造種類、延床面積、屋根構造等の情報を有している。益城町の災害廃棄物処理量（実績）と解体建物の延床面積から、延床面積当りの災害廃棄物量原単位（推計）を算出し、瓦屋根木造建物の場合 $0.57 \text{ (t/m}^2\text{)}$ 、瓦屋根以外の木造建物の場合 $0.51 \text{ (t/m}^2\text{)}$ と推計した。木造建物の組成別（木くず、コンクリート及び瓦）の延床面積（瓦は建築面積）当り災害廃棄物量原単位（推計）も算出した。従来、瓦のみで組成別災害廃棄物量原単位は調査されていなかったが、建築面積当り災害廃棄物量原単位（推計）は $0.06 \text{ (t/m}^2\text{)}$ と推計した。瓦屋根は他の屋根部材に比べ重く、廃棄物要処理量が大きくなる要素の一つと考えられていたため、瓦の原単位を得たことは大きな意味がある。なお、非木造の災害廃棄物量原単位（推計）は、算出できていない。

建物構造別の解体建物棟数と延床面積の内訳がわかったことによって、木造の災害廃棄物量原単位を算出できた。災害廃棄物量原単位（モデル解体調査）が離散的な計測値の平均であることに対して、本研究で算出した、木造建物の災害廃棄物量原単位は、解体建物の構造別延床面積を算出して益城町全体の災害廃棄物処理量の平均値を計算していることから、この結果を第1章で提案した災害廃棄物量推計式に用いることは妥当と考える。

参考文献(第3章)

- [1] 熊本県益城町：平成 28 年熊本地震による益城町災害廃棄物処理事業記録, 2018 年 3 月.
<https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/20788.pdf> (参照 2021 年 2 月 6 日)
- [2] 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：災害廃棄物対策指針(本編), 2018 年 3 月.
http://kouikishori.env.go.jp/guidance/guideline/pdf/position_of_pointer_main.pdf
(参照 2021 年 2 月 6 日)
- [3] 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：災害廃棄物対策指針【技 14-2】災害廃棄物等の要処理量の推計方法, 2020 年 3 月.
http://kouikishori.env.go.jp/guidance/download/pdf/pdf_all_2020.zip
(参照 2021 年 2 月 6 日)
- [4] 一般社団法人 全日本瓦工事業連盟, 全国陶器瓦工業組合連合会, 全国厚型スレート連合会：瓦屋根標準設計・施工ガイドライン, 2012 年 5 月.
<http://www.yane.or.jp/kawara/guide.shtml> (参照 2021 年 3 月 2 日)

第3章 益城町の解体建物全数調査に基づく災害廃棄物量原単位の算出

第4章 益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析

4.1 はじめに

本章は、第1章で提案した災害廃棄物発生量推計式の内、図4-1に示す赤字部分の係数を分析することが目的である。第2章で作成した建物データベースには、益城町の全ての建物について解体か現存の識別し、解体建物には被害判定結果と建物構造等の情報を関連付けしている。災害廃棄物発生量推計式に用いる係数を求める。作成した建物データベースから、被害建物のうち解体される建物の割合である解体率、解体建物の構造内訳、並びに構造別延床面積を算出する。

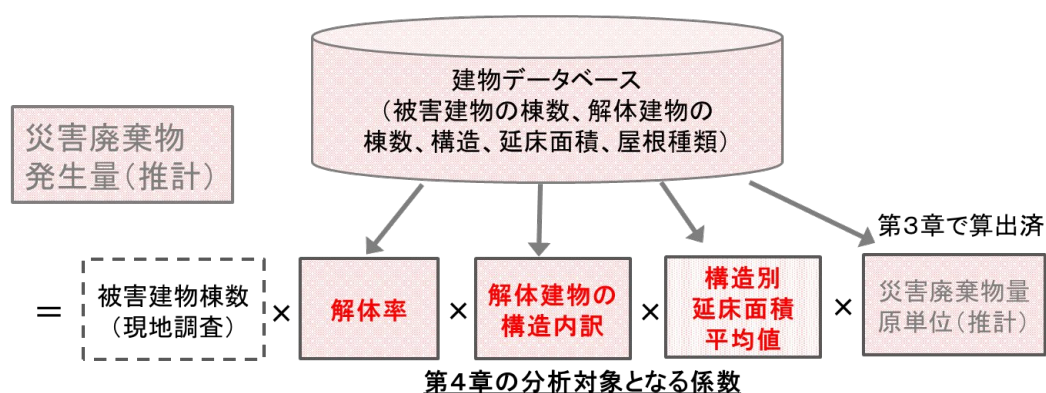


図 4-1 第4章で分析する災害廃棄物量推計式の係数

4.2 被害別の解体率

第3章で作成した益城町の解体建物の建物データベースでは、全建物 16,106 棟の内、11,462 棟に全壊から一部損壊までの被害判定結果が関係付けられている。全壊、半壊、一部損壊の判定がない建物 4,644 棟の内、141 棟は無被害であるが、4,503 棟は被害判定がない状態である。まず、被害判定が関係付けられている、全壊、大規模半壊、半壊及び一部損壊建物に対する解体建物の割合（解体率）を計算し、表 4-1 に示す。

第4章 益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析

表 4-1 益城町の建物データベースによる被害別の解体率

	全壊	大規模半壊	半壊	一部損壊	無被害	合計
解体建物 (棟)	3,419	399	584	402	124	4,804
被害建物 (棟)	4,010	870	2,498	4,084	17	11,462
解体率	85.3%	45.9%	23.4%	9.8%	87.9%	35.4%

従来、全壊建物は全て解体されていたと考えられていたが、約 15%は解体されていないことが分かった。大規模半壊と半壊の被害建物に対して、45.9%と 23.4%が解体されており、大規模半壊と半壊を合わせると、約 30%が解体されていることが分かった。

一方、無被害建物 141 棟の中から 124 棟が解体されている。この理由は次の項で述べる。4503 棟の被害判定されていない建物の中から 773 棟が解体されている。判定されていない建物から約 17%が解体されていることになり、無視できない数値である。

4.3 解体されなかった全壊建物と解体された無被害建物の分析

全壊判定であるが、解体されなかった建物が益城町全体で、600 棟程度あることがわかった。全壊判定で解体されてなかった建物と無被害で解体された建物の棟数やその要因について分析した。

4.3.1 災害廃棄物処理事業完了後に解体された建物

本研究では、災害廃棄物処理事業とほぼ同じ期間である 2018 年 3 月 25 日まで複数日で撮影した衛星画像を使って判読することによって解体建物と扱っている。災害廃棄物処理事業期間中に、所有者が解体を決定、または実行できない事情があり、2018 年 4 月以降に全壊・半壊建物が解体された可能性が考えられる。2018 年 4 月以降に全壊被害の解体された建物があるか 2018 年 10 月撮影の衛星画像を見て確認した。図 4-2 に示すように、全壊建物で 2018 年 3 月時に解体されていなかった建物（水色建物輪郭）の中で、2018 年 10 月には解体されている建物（黄色円内）があった。しかし、その棟数は極僅かである。災害廃棄物処理事業期間中に解体されなかった全壊判定の建物が、その後に解体される可能性は少ないと考える。

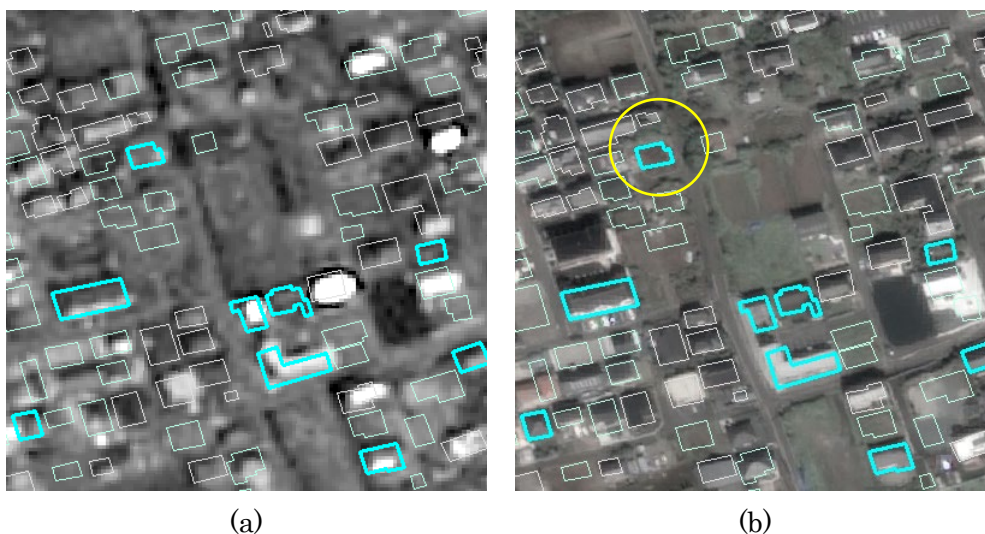


図 4-2 災害廃棄物処理完了後に解体された建物の例

- (a) 2018年3月25日撮影時に存在;
- (b) 2018年10月13日撮影時に解体済み。

4.3.2 全壊建物の応急修理

全壊判定でも解体されていない建物が一定数あるとすると、修理していることが考えられる。修理されている状況や割合について調査した。公費解体制度とは別に、応急修理の補助金制度がある。応急修理の補助金制度に申請した場合、公費解体制度には申請できないという条件がある。益城町の災害廃棄物処理事業記録^[1]には、「**応急修理制度を利用して修繕した住家は、解体撤去しなければならない特段の理由がある場合を除き、原則として公費解体の対象にしない**」方針にしたことが記載されている。また、「修理して現在の家に住むか、解体して新しい家を建てるかという選択を迫られているが、申請者がなかなか決断できない」という記述もある。建物の被害を受けた益城町の住民は、公費解体制度か応急修理の補助金制度のどちらかを選択を必要があり、一定割合の全壊建物及び半壊建物が解体されなかったであろうことが伺われる。

熊本県の熊本地震における災害廃棄物処理の記録^[2]によると被害建物の解体と応急修理の割合について統計調査は行っていないものの、「作業(2016年9月)時点で解体申請の件数と応急修理の件数を調査・比較したところ、全壊判定家屋等については概ね9:1、大規模半壊・半壊家屋等では概ね4:6」という記述がある。熊谷ら^[3]は益城町の被災世帯について、応急修理制度の未利用者に着目してアンケート調査を行っている。全壊世帯2,193件の内約12%、大規模半壊世帯579件の内約48%、半壊世帯1,530件の内約72%が応急修理制度を利用しているとの調査結果であり、熊本県の記述とも整合している。

また、熊本市マンション管理組合連合会が公開しているブログ^[4]には、熊本地震5年後の熊本市の集合マンションの解体状況について記事が掲載されていて、「地震で約600のマンションが被災し、うち40件が全壊か大規模半壊と判断され、公費解体後に敷地を売却したのが9件、修繕して住み続ける事を選択したのが25件、建て替えを決めるなどし

たのが6件。全員同意が取れなかったため公費解体の申請に間に合わず、市の救済制度を使って今春ようやく解体に入るマンションがある」という調査状況を述べている。集合マンションの場合、解体か修繕かいずれにするか住人の合意をとる必要があり、その決定に時間がかかることと、大規模半壊以上の被害であっても住人にとって費用負担が大きくなる建て替えを決定する割合は多くないことが分かる。

総務省は、応急修理の状況調査について、災害時の「住まい確保」等に関する行政評価・監視の報告書⁵⁾にまとめている。大規模災害後において、全壊の家屋であっても「修理することで居住が可能であれば応急修理制度を利用することができる」という応急修理制度を利用可能な状況であることを示唆している。

上記のような調査結果もあり、全壊建物であっても応急修理している割合が一定程度あることを確かめられた。熊本県の記録で、災害廃棄物処理事業の初期の段階で、全壊建物の応急修理の割合が約1割程度であると述べられた数字と本研究の解体率の傾向はかなり近いことも分かった。

4.3.3 無被害で解体された建物

無被害と判定された建物の棟数が141棟あり、そのうち124棟が解体されている。建物がほとんど損傷していないという状況にしては、87.9%と解体率が多く、他の被害判定の建物の解体率と比較すると、全壊建物の解体率に近い。益城町においては推察するに、無被害の建物は損傷度合いからではなく、他の事由があつて解体されたと推察される。例えば、無被害の建物に全壊建物が隣接していて、全壊建物を解体する際、無被害の建物を解体せざるを得ない場合、あるいは、被害の大きい建物に無被害の建物が同一敷地内にあり、敷地全体で再建築を行う等の事情があつて、無被害の建物が解体されたという可能性は十分あり得ると考える。また、益城町災害廃棄物処理事業記録には、無被害建物とは明記されてなく、棟数も明確でないが、全壊・半壊以外の建物が半壊以上の建物と一緒に解体された建物があつたことを示す記述がある。

衛星画像において無被害の解体建物とその周辺を確認し、周辺の建物と一緒に解体された可能性があるかと推測される箇所が45件あつた。その一例を図4-3に示す。しかし、79件は周囲の建物とは独立しているといつてよい程度の周囲の建物距離があつた。これらの無被害建物が解体された要因は分からないが、解体建物の全棟数のうち1%程度であるため、無被害の解体建物を加算しなくても一部損壊までの被害建物棟数に解体率を乗じて推計する解体建物棟数に与える影響は少ないと考えた。

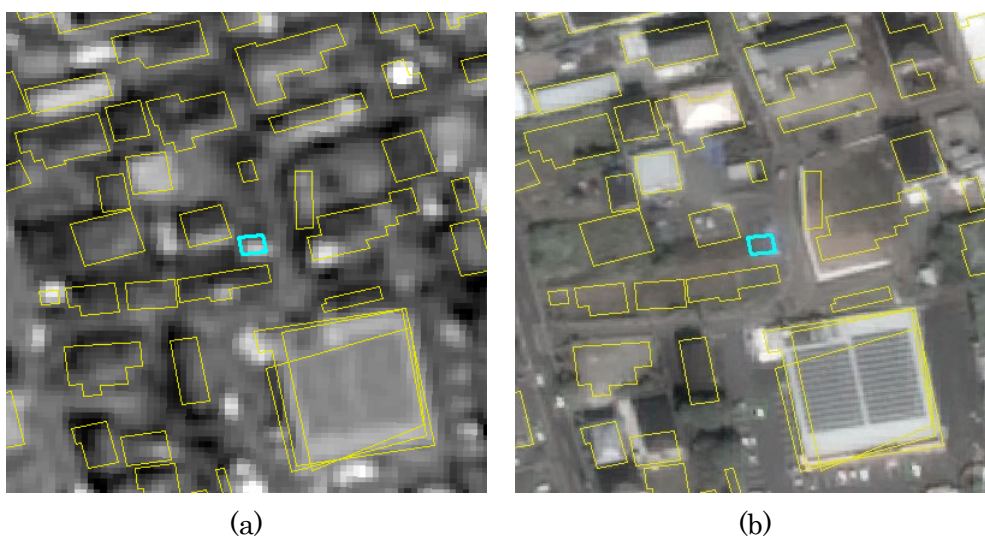


図 4-3 無被害の建物が周辺建物と一緒に解体されたと推測した例

(a) 2016年3月20日撮影;

(b) 2018年10月13日撮影.

4.4 被害・建築年代別の解体率

益城町の建物データベースの11,603棟の建物には、建築年代が格納されていることから、被害と建築年代別の解体率についても分析した。建築年代を1982年以前（旧耐震基準）、1982年から2000年（新耐震基準）、2001年以降、年代不明で分けて、被害建物棟数を図4-4(a)に示す。図4-4(a)に建築年代別の被害建物棟数、並びに建築年代別の解体率と解体建物棟数を図4-4(b)に示す。図4-4(b)の棒グラフの添字は解体率と解体棟数を示している。特に、全壊について1982年以前の解体率は87%であり、2000年以降になると全壊でも解体率は54%である。建築年代が新しくなるにつれて解体率が低くなる傾向がわかったので、建築年代別の解体率を考慮することによる解体建物棟数の推計値への寄与について分析する。全壊建物と解体建物について建築年代別の棟数を図4-4(c)に示す。添え字は全壊建物と全壊の解体建物について2000年以降に建築された建物の割合を示しており、全壊建物の内3.5%、解体建物の内2.2%程度である。また、自治体の被害認定調査では被害建物の建築年代の調査は行われていない。もし、建築年代の調査が併せて行われることとなったとしても解体建物棟数の推計値への寄与は少ない。そのため、解体建物棟数の推計に建築年代別に細分化した解体率を取り込まないこととした。

第4章 益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析

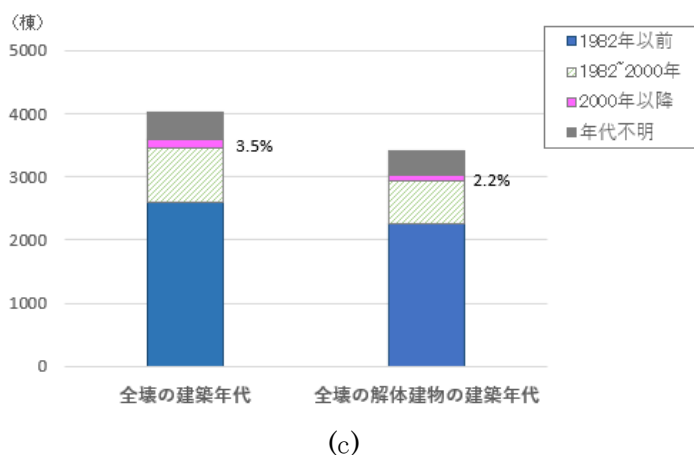
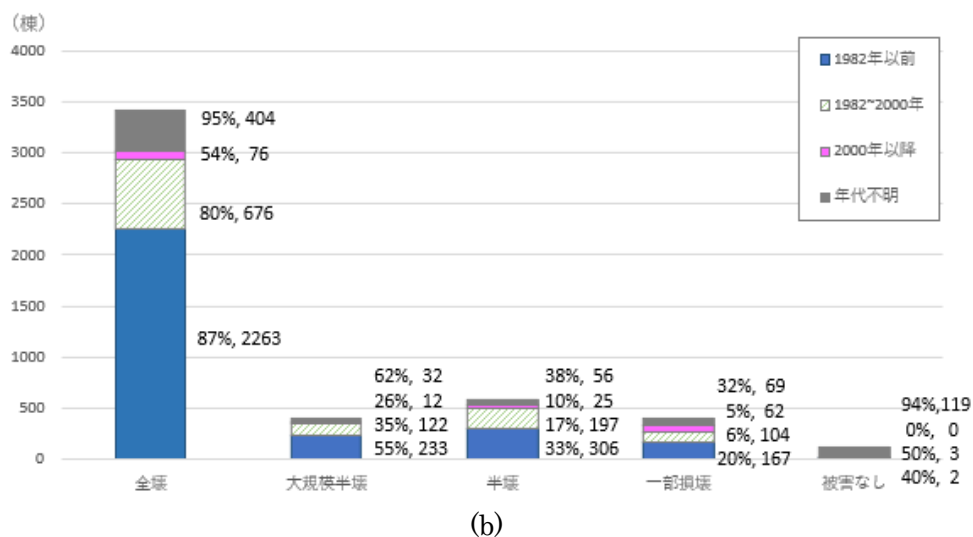
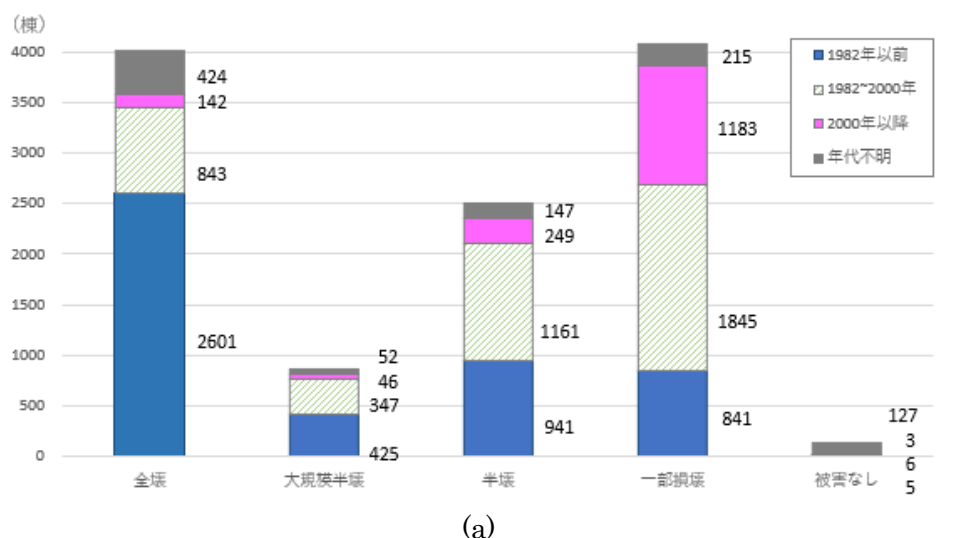


図 4-4 被害・建築年代別の解体率と解体建物棟数

- (a) 被害・建築年代別の被害建物棟数；
- (b) 被害・建築年代別の解体率と解体建物棟数；
- (c) 益城町の全壊建物棟数と解体建物棟数の建築年代内訳。

4.5 住家以外の建物も含めた解体建物の推計

本研究の解体建物の推計方法では、自治体の住家被害建物棟数に解体率をかけて、計算することを提案した。しかし、建物データベースに格納した、住家（家屋台帳の用途では居宅・共同住宅）と住家以外の棟数を調べ、解体建物と現存建物、並びに被害判定の有無で、棟数を分類すると、表4-2に示す結果となり、解体建物の約45%は住家以外の建物であることが分かった。更に、住家以外の解体建物2,570棟の内773棟は、被害判定されないまま解体されている。

表 4-2 益城町の建物の用途及び被害判定有無の内訳

	用途	被害判定あり	被害判定なし	計
解体建物 (棟)	住家 ^{注1}	3,131	0	5,701
	住家以外 ^{注2}	1,797	773	
現存建物 (棟)	住家 ^{注1}	5,499	0	10,405
	住家以外 ^{注2}	1,176	3,730	
計		11,603	4,503	16,106

注1：居宅と共同住宅。

注2：物置、倉庫、工場、病院、店舗、事務所、遊技場、旅館、宿舍、車庫等。

住家以外の解体建物を含めた解体建物棟数を推計するために、図4-5に示す、住家の被害建物棟数に解体率をかけて住家の解体建物棟数を推計し、益城町の住家以外も含む建物総数と住家建物の棟数の比（以下、「建物係数」という）を乗算する式を考えた。

$$\boxed{\text{住家以外も含む解体建物棟数}} = \sum_i \boxed{\text{自治体の住家被害建物棟数}} \times \boxed{\text{解体率}} \times \boxed{\text{建物係数}}$$

i ：全壊、半壊、一部損壊

図 4-5 住家以外も含む解体建物棟数の推計方法

益城町の建物係数は、住宅・土地統計調査から算出し、1.35と求めたので、益城町の住家の全壊、半壊、一部損壊の棟数に解体率及び建物係数を乗じた解体建物棟数を推計し、実際の解体建物棟数に近い値となるか確かめる。表4-3に示す通り、住家以外も含む解体建物棟数（推計）は5,366棟となり、益城町の解体建物棟数（実績）5,702棟より少ないものの、約6%の差であり、近い値である。

第4章 益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析

表 4-3 益城町の解体率と建物係数を使って推計した解体建物棟数

	全壊	半壊	一部損壊	合計
住家被害建物棟数	3,026	3,233	4,325	10,584
解体率	85.0%	30.0%	10.0%	—
住家の解体建物棟数（推計）	2,572	970	433	3,975
住家以外も含む 解体建物棟数（推計）	3,472	1,310	585	5,366

4.6 解体建物の建物構造内訳と構造別延床面積の算出

図 4-1 で示した災害廃棄物量推計式の係数のうち、解体建物の構造内訳を求める。益城町の建物データベースには解体建物の建物構造及び延床面積が格納されている。解体建物の建物構造の内訳について、棟数、延床面積とその比率について算出した結果を表 4-4 に示す。

表 4-4 益城町の解体建物の建物構造内訳

	棟数	延床面積	面積比率
木造	5,030	514,229	88.2%
LS造	238	21,573	4.2%
S造	95	14,237	1.7%
SRC造	0	0	0.0%
RC造	16	10,921	0.3%
CB造	23	2,049	0.4%
その他	299	17,467	5.2%
計	5,701	580,475	100.0%

解体建物の内、ほとんどが木造であることが分かった。益城町では、SRC造の解体建物はない。比較的重い組成の割合が多い構造であるRC造とCB造の割合は少なく、合計でも1%未満であった。

更に、被害別に建物構造内訳を設定できる可能性があるかを検討する。建物構造と被害別に、解体率と被害建物棟数を表 4-5 に示す。

表 4-5 益城町の建物構造と被害別の解体率

	全壊		半壊		一部損壊	
	解体率	棟数	解体率	棟数	解体率	棟数
木造	86.1%	3,813	29.3%	3,099	9.2%	3,061
LS造	66.4%	119	27.0%	152	13.0%	576
S造	71.2%	59	23.6%	89	9.6%	333
SRC造	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	1
RC造	62.5%	8	41.2%	17	4.3%	92
CB造	85.7%	7	0.0%	7	37.5%	16
その他	100.0%	4	75.0%	4	40.0%	5
全構造計	85.3%	4,010	29.3%	3,368	9.8%	4,084

表 4-5 の構造別と被害別に示した解体率の傾向をみると、CB 造の半壊の解体率が 0% となっているが、それ以外の構造では全壊の解体率が高く、次に半壊、一部損壊という順に下がる傾向である。木造の被害別の解体率についてみると、木造の棟数が多く、全構造の解体率と木造建物の解体率は、ほぼ同じ値になっている。LS 造/S 造の被害別の解体率をみると、全壊の解体率が全構造や木造の解体率より低い値であるが、半壊と一部損壊について、全構造の解体率に近い値である。SRC 造については解体建物がない。RC 造、CB 造、その他の建物についても、被害別の解体率の傾向が全構造計の解体率の傾向と違いがあるが、全壊と半壊の建物棟数が少ない。

表 4-5 で、建物構造と被害別の解体率を示したものの、RC 造、CB 造とその他のサンプル数が少なくばらつきがあること、並びにサンプル数が多い、木造、LS 造、S 造の被害別の解体率の傾向は全壊の解体率が高く、次に半壊、一部損壊という順に解体率が下がる傾向であり、全構造合計の傾向に似ているという 2 つの観点から、建物構造の内訳は被害別に分けずに、表 4-4 に示した解体建物の延床面積割合を適用することとする。

もう一つ、構造内訳を設定するにあたって、構造種類をどこまで分けるかについても考える必要がある。第 3 章で原単位を算出する際、非木造の解体建物棟数が全体的に少ないことから、LS 造と S 造の区別、並びに RC 造と CB 造の区別をしなかった。表 4-5 の解体建物の構造別内訳では、木造が 9 割近く占めていることもあり、LS 造/S 造や RC 造/CB 造は全体からすると数%であるため、LS 造と S 造等を細かく分類しなくても、LS 造/S 造を 1 分類、RC 造/CB 造をまとめて 1 分類としても、災害廃棄物量の推計に与える影響は少ないと考える。一方、木造については、瓦の災害廃棄物量原単位が一定の割合があるため、瓦屋根の木造（木造・瓦）と瓦屋根以外の木造（木造・瓦以外）に分けている。表 3-4 と同じ分類項目を考慮して、建物構造と解体建物の内訳に基づく構造別の解体建物延床面積推計モデルを設定することとした。木造が 88%、非木造が 12%程度である。木造のうち、瓦屋根と瓦屋根以外の木造を 85%と 15%に分け、88%乗じて、75%と 13%にする。非木造のうち、コンクリートを多く使う RC 造/CB 造を 1%とした。LS 造/S 造を 6%、その

第4章 益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析

他を5%として設定した。

表4-3の解体建物棟数（推定）5,366棟に対して、表3-4と同じ構造種別として割合を計算すると、構造別の解体建物棟数（推計）を得る。益城町の建物データベースに基づいて構造別に1棟当り延床面積を求め乗じることによって、延床面積の内訳を算出できる。算出した、解体建物棟数、1棟当り延床面積及び延床面積内訳を表4-6に示す。

表 4-6 益城町の解体建物の構造別割合と面積内訳推計

建物構造種別	割合	解体建物棟数推計	1棟当り延床面積	延床面積内訳推計
木造・瓦	75%	4,025	123	494,209
木造・瓦以外	13%	698	123	85,663
LS造/S造	6%	322	123	39,537
RC造/CB造	1%	54	300	16,098
その他	5%	268	123	32,947

4.7 算出した係数を用いた益城町の災害廃棄物発生量の推計

表4-6の益城町の解体建物の構造別の延床面積内訳の推計値と第3章で求めた木造の延床面積当りの災害廃棄物量原単位（推計）を使って、災害廃棄物発生量を推計し、実績値と比較する。ただし、非木造の原単位は第3章で求められなかった。そこで、非木造の原単位を設定する必要がある。RC造/CB造の延床面積当り災害廃棄物量原単位には熊本地震モデル解体調査のRC造の原単位を用いる。LS造/S造とその他の災害廃棄物量原単位も算出していない。一般に、S造は木造よりも原単位が大きいとされるが、第3章でコンクリート及び金属の組成の災害廃棄物量原単位を算出する際、LS造/S造及びその他は木造に比べて建物棟数が少なかったため、独立変数とせず、木造を主とする1グループ構造に併せて、木造の災害廃棄物量原単位を算出したためである。そのため、LS造/S造及びその他の延床面積当り災害廃棄物量原単位は木造と同程度とし、表3-4の瓦屋根木造と瓦屋根以外の木造の延床面積当り災害廃棄物量原単位の中央値とする。図4-1で示した、災害廃棄物量の推計式を数式で表現すると式(4-1)となり、表4-6の結果と設定した原単位を入力して、災害廃棄物量を推計する。

第4章 益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析

$$CW = \sum(CM_j \times Cc_j) \quad \dots \text{式 (4-1)}$$

ここで、 CW ：災害廃棄物発生量（推計）（t）

CM_j ：表 4-7 の建物構造別の解体建物延床（または建築）面積（ m^2 ）

Cc_j ：建物構造別の延床面積当り災害廃棄物量原単位（ t/m^2 ）

j ：建物構造種別（木造・瓦、木造・瓦以外、LS造/S造、RC造/CB造、その他）

災害廃棄物発生量を計算した結果、合計は約 38.1 万 t となった。計算過程の構造別の延床面積、原単位並びに災害廃棄物発生量推計結果を表 4-7 に示す。益城町の片付けごみを除いた災害廃棄物処理量（実績）の合計が約 32.5 万 t に対して、約 17%の差で推計できた。

表 4-7 益城町の構造別延床面積、原単位及び災害廃棄物発生量の推計値

建物構造種別	延床面積推定 (m^2)	原単位 (t/m^2)	災害廃棄物発生量 推計 (t)
木造・瓦	490,989	0.57	279,864
木造・瓦以外	85,105	0.51	43,403
LS造/S造	39,279	0.54	21,211
RC造/CB造	16,098	1.17	18,835
その他	32,733	0.54	17,676
合計			380,988

4.8 本章のまとめ

解体建物の解体率と構造内訳の分析結果についてまとめる。第2章で作成した、益城町の全解体建物の建物データベースに、被害判定結果と解体建物に関連付けされていることから、災害廃棄物発生量推計式の係数の一つである、被害別の解体率を算出した。従来、全壊建物は全て解体されていたと考えられていたが、全壊建物の約 85%が解体されているが、他は応急修理されている可能性が高いことが分かった。大規模半壊と半壊を合わせて約 30%、一部損壊建物の約 10%が解体されている。また、本研究では建築年代も建物データベースに格納していることから、被害判定結果、建築年代と解体率の関係を分析した結果、同じ被害判定でも建築年代が新しいほど解体率が低くなっていることを示した。しかし、2000年以降に建築された建物が全壊や解体建物となった割合は少なく、解体建物棟数の推計への寄与は少ない。また、自治体の被害認定調査では被害建物の建築年代の調査は行われていない状況もあり、解体建物棟数の推計に建築年代別に細分化した解体率を取り込まないこととした。一方、解体建物には、住家以外の建物が約 45%あることが分かった

第4章 益城町の解体建物の解体率と構造内訳の分析

ため、解体建物棟数を推計する際、自治体の住家被害建物棟数に被害別の解体率及び建物係数を乗じて解体建物棟数を推計する方法を提案し、実際の解体建物棟数に近い値で推計できることを明らかにした。

災害廃棄物量推計式でもう一つ重要な係数である、解体建物の建物構造内訳も分析した。益城町の建物データベースに格納されている建物構造と延床面積から解体建物の構造別の延床内訳を算出し、その割合は木造建物がほとんど占めていて、瓦屋根の木造建物、瓦以外の木造建物が75%, 13%であることが分かった。LS造/S造,その他, RC造/CB造の順で、6%, 5%, 1%であった。提案した災害廃棄物量推計方法に、第3章で算出した木造の災害廃棄物量原単位、RC造/CB造には熊本地震モデル解体調査の原単位、並びに本章で分析した構造内訳等の係数を適用し、益城町の災害廃棄物処理量（実績）約32.5万tに対して約38万tと近い値で推計できることを示した。これらの分析結果によって、災害廃棄物発生量の推計式に用いる、解体率及び構造別の延床面積内訳を得ることができた。

参考文献(第4章)

- [1] 益城町：平成28年熊本地震による益城町災害廃棄物処理事業記録, 2018年3月。
<https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/20788.pdf> (参照 2021年2月6日)
- [2] 熊本県：平成28年熊本地震における災害廃棄物処理の記録, 2019年3月。
<https://www.pref.kumamoto.jp/uploaded/attachment/20788.pdf> (参照 2021年2月6日)
- [3] 熊谷克也, 渡邊 萌, 佐藤嘉洋, 円山琢也：2016年熊本地震益城町における応急修理制度の未利用者に着目した実態分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 第75巻, 第3号, pp.181-190, 2019.
- [4] 特定非営利法人熊本県マンション管理組合連合会：ブログ記事 震災5年 全壊マンションの現状 朝日新聞, 2021年4月。
<https://www.kumakanren.jp/2021/04/28/震災5年-全壊マンションの現状-朝日新聞>(参照 2021年6月29日)
- [5] 総務省：災害時の「住まい確保」等に関する行政評価・監視―被災者の生活再建支援の視点から―結果報告書, 2020年3月。
https://www.soumu.go.jp/main_content/000679298.pdf(参照 2021年6月29日)

第5章 熊本地震における解体率を用いた災害廃棄物発生量の推計と実績の比較

5.1 はじめに

第 1 章で解体建物棟数に基づく災害廃棄物発生量の推計式を提案した。既存の研究では、被害建物の解体率や災害廃棄物量原単位など十分な研究が行われていなかったが、第 2 章でその分析を行うための建物データベースを作成して、第 3 章では、益城町の災害廃棄物処理量と解体建物の延床面積から災害廃棄物量原単位を算出した。第 4 章では被害建物の解体率と構造内訳を分析した。本章では、被害が甚大であり災害廃棄物処理に二次仮置場を要した、8 市町村（熊本市、宇土市、御船町、南阿蘇村、益城町、西原村、甲佐町、嘉島町）を対象とし、住家被害建物棟数を入力値として、分析した係数を使って解体建物棟数（推計）と災害廃棄物発生量（推計）を計算する。また、既存の推計方法についても住家被害建物棟数を入力し、災害廃棄物量（推計）を計算する。既存の推計値と本研究の推計値について、災害廃棄物処理量（実績）との残差を計算し、次の比較を行い、既存の推計方法より推計精度が向上していることを示す。

- ・ 8 市町村の災害廃棄物量の各推計値の残差が±20 万 t 以内
- ・ 8 市町村の災害廃棄物量推計値の合計が既存の推計方法より実績に近い

また、速報の被害建物棟数も入力し、推計値がどの程度の実績値に近づくか実験を行う。本研究における第 5 章の調査研究対象を図 5-1 に示す。

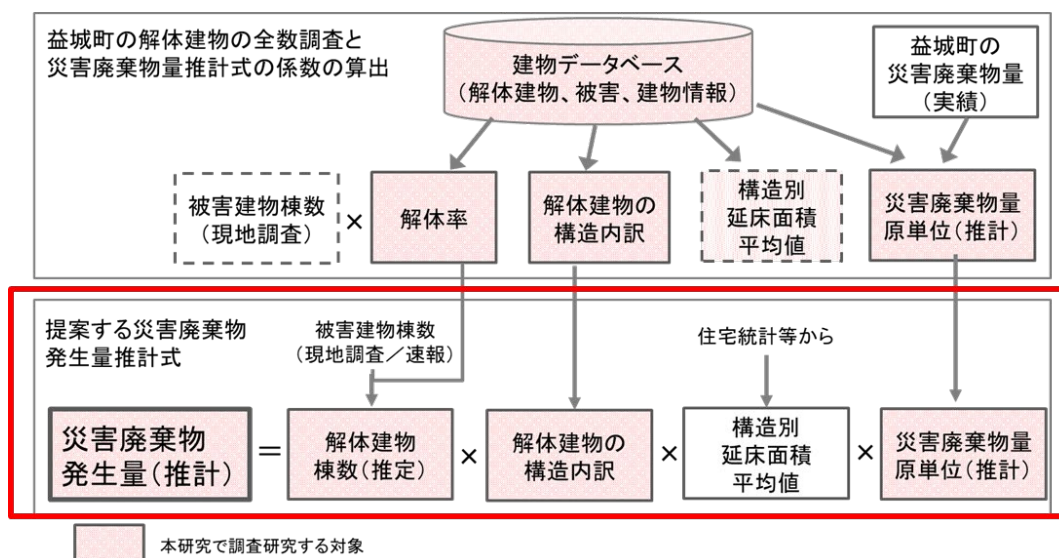


図 5-1 第 5 章の調査研究対象

5.2 解体建物棟数と災害廃棄物発生量の推計式

本研究で提案した災害廃棄物量の推計方法を被害が甚大であった8市町村に適用して、災害廃棄物発生量を推計していく。第3章と第4章で分析した結果を解体建物棟数と災害廃棄物量を推計する式に適用する関係を図5-2に示す。第4章で分析した、被害別の解体率と建物係数を適用して解体建物棟数を推計する。次に、推計した解体建物棟数を入力して、第4章で分析した解体建物の構造内訳、住宅統計等から得られる熊本県の構造別延床面積平均値、並びに第3章で分析した災害廃棄物量原単位を適用して、災害廃棄物発生量を推計する。

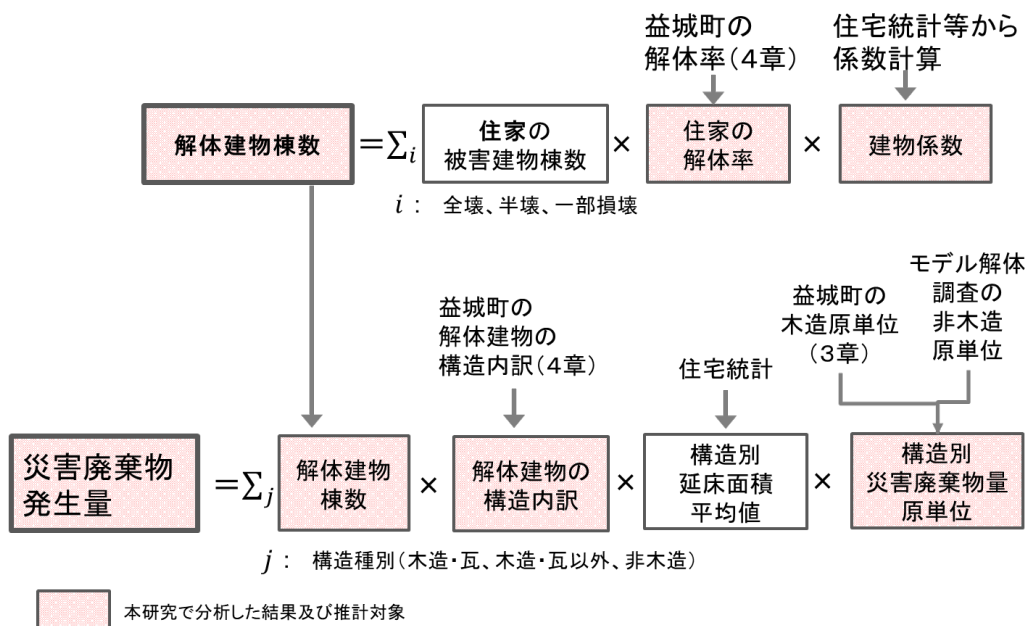


図 5-2 分析した係数と災害廃棄物量推計式への適用の関係

図5-2に示した、自治体の住家または速報の被害建物棟数被害建物棟数から解体建物棟数を推計する方法を数式で表現すると式(5-1)となる。

$$DY = (\sum DX_i \times Da_i) \times Db \quad \dots \text{式 (5-1)}$$

ここで、DY：解体建物棟数（推計）（棟）

DX_i：自治体の住家または速報の被害建物棟数（棟）

Da_i：被害別解体率

Db：建物係数（DX_iが住家被害建物棟数の場合に適用する、建物総数と住家棟数の比）

i：被害（1:全壊、2:半壊、3:一部損壊）

図5-2の災害廃棄物量を推計する方法を数式で表現すると、式(5-2)となる。

$$DW = \sum(DY \times Dc_j \times Dd_j \times De_j) \quad \dots \text{式 (5-2)}$$

ここで、 DW ：災害廃棄物発生量（推計）（t）

Dc_j ：解体建物の構造内訳

Dd_j ：建物構造別の 1 棟当りの平均延床面積（ m^2 ）

De_j ：建物構造別の延床面積当り災害廃棄物量原単位（ t/m^2 ）

j ：建物構造種別（木造・瓦、木造・瓦以外、LS 造/S 造、RC 造/CB 造、その他）

以降、数式（5-1）と（5-2）に自治体の住家被害建物棟数及び速報の被害建物棟数を入力して災害廃棄物量を推計した結果が既存の推計方法より推計精度が向上しているか確認していく。

5.3 災害廃棄物発生量推計式に用いる係数

解体建物棟数の推計式（5-1）の係数である、被害別の解体率、建物係数、並びに災害廃棄物発生量の推計式（5-2）の係数である、解体建物の構造内訳、建物構造別の延床面積平均値、災害廃棄物量原単位について、改めて整理する。

被害別の解体率は、第 4 章で求めた表 4-3 の被害別の解体・現存建物棟数と解体率を用いる。なお、熊本県の報告による住家被害建物棟数は大規模半壊と半壊を区別していないことから、大規模半壊と半壊を合わせて、半壊の解体率としている。解体建物棟数の推計式（5-1）に用いる被害別の解体率を表 5-1 に示す。

表 5-1 解体建物棟数推計に用いる被害別の解体率

	全壊	半壊 ^{注 1}	一部損壊
解体率	85%	30%	10%

注 1：大規模半壊と半壊を合わせた場合

式（5-1）の建物係数は、第 4 章では、益城町の住家被害建物棟数から住家以外を含む解体建物棟数を推計するために、益城町の建物データベースから益城町全体の建物総数と住家棟数の比から求めた。益城町以外で推計式（5-1）に適用する、建物係数 Db を算出する方法について検討する必要がある。益城町以外の市町村の建物係数を求めるためには、地図データ等から住家以外も含む建物総数、並びに市町村が管理する家屋台帳等から住家棟数を計算する方法がある。しかし、熊本県全体の地図データから各自治体の建物棟数を計測する方法は時間を要する上に、家屋台帳は一般に公開されていないため、益城町と同様の方法で建物係数を求めることは難しい。そのため、別の方法とし、REIC 速報の建物総数と住宅・土地統計調査の住家棟数を使って、建物係数 Db を算出することとした。推計の比較対象とする 8 市町村において、住宅・土地統計調査から抽出した住家棟数、REIC の被害推計建物と無被害建物の合計による建物棟数、並びに建物棟数と住家棟数の比である建

第5章 熊本地震における解体率を用いた災害廃棄物発生量の推計と実績の比較

物係数 Db を表5-2に示す。ただし、住宅統計とREICのデータが揃わない市町村、または建物棟数が少ない場合は、建物係数は熊本県全体の平均値1.1とした。

表 5-2 住宅・土地統計調査の住家棟数とREICの建物棟数による建物係数

	町村名	住宅棟数	建物棟数	係数 Db
1	熊本市	317,200	250,146	1.10
2	益城町	11,890	16,063	1.35
3	御船町	6,160	11,424	1.85
4	西原村	データ無し	5,010	1.10
5	南阿蘇村	データ無し	11,158	1.10
6	甲佐町	データ無し	7,982	1.10
7	宇土市	13,720	20,236	1.47
8	嘉島町	データ無し	5,066	1.10

続いて、推計式(5-2)の係数である、解体建物の構造内訳と建物構造別の1棟当りの平均延床面積について、益城町以外の市町村への適用する値を示す。解体建物の構造内訳に関する情報は他になく、熊本県全体でも解体する建物の構造割合は、益城町の解体建物の構造内訳と同じになると仮定し、益城町の調査結果である表4-7と同じ割合を設定することとした。建物構造別の1棟当りの平均延床面積について設定する必要がある。木造、LS造/S造、その他については、住宅・土地統計調査から各市町村の戸建て1棟当り平均延床面積を参照し、概ね122~130m²の幅であった。RC造/CB造の平均延床面積については、熊本市と熊本市以外では、1棟のマンションの戸数規模が異なることを想定した。そこで、平成24年度熊本市分譲マンション実態調査報告書¹⁾を調査したところ、1棟当り分譲戸数が31戸~40戸で多いことと住宅・土地統計調査の共同住宅の平均延床面積が50m²であり、30戸を乗じて、熊本市では延べ床面積を1500m²と設定した。熊本市以外では、益城町の建物データベースのRC/CB造の平均延床面積を参照して、300m²とした。表5-3に構造別の延床面積内訳と1棟当りの延床面積を示す。

表 5-3 災害廃棄物量推計式に適用する構造内訳と延床面積平均値

建物構造種別	割合	1棟当り延床面積平均値	
		熊本市	熊本市以外
木造・瓦	75%	123	122~130
木造・瓦以外	13%	123	122~130
LS造/S造	6%	123	122~130
RC造/CB造	1%	1500	300
その他	5%	123	122~130

災害廃棄物発生量の推計式 (5-2) の災害廃棄物量原単位について、表 5-4 に示す、第 3 章で得た結果とモデル解体調査の RC 造/CB 造の値を適用する。

表 5-4 災害廃棄物量推計式に適用する災害廃棄物量現原単位 (t/m²)

	木造 瓦屋根	木造 瓦屋根以外	LS 造/S 造	RC 造/CB 造	その他
原単位	0.57	0.51	0.54	1.17	0.54

5.4 自治体の被害調査に基づく災害廃棄物量の推計と実績の比較

本研究で提案する解体率を組み入れた災害廃棄物量推計方法において、熊本地震の各市町村の住家被害建物棟数を入力し、解体率、構造内訳、災害廃棄物発生量原単位(推計)を用いて、災害廃棄物発生量(推計)を計算する。既存の災害廃棄物量推計式 (1-1) による災害廃棄物発生量(推計)も計算し、本研究と既存の推計値と災害廃棄物処理量(実績)の残差を求め、残差の総量と標準偏差が既存の推計結果より小さくなるか確かめる。

5.4.1 対象市町村

災害廃棄物量の推計と実績を比較する市町村は、第 1 章で述べた、被害が甚大で二次仮置場での災害廃棄物処理を必要とした、8 市町村(熊本市、宇土市、御船町、南阿蘇村、益城町、西原村、甲佐町、嘉島町)とする。熊本市の災害廃棄物は同市内の二次仮置場に収集され、他 7 市町村の災害廃棄物は益城町内に設置された二次仮置場に収集しており、対象 8 市町村の位置を図 5-3 に示す。



図 5-3 推計と実績の比較対象 8 市町村

5.4.2 自治体の住家被害建物棟数による解体建物棟数の推計と実績

解体建物棟数の推計式 (5-1) に入力し、熊本地震で被害を受けた市町村の住家被害建物棟数を収集する。熊本地震後、各市町村で現地調査による住家被害建物棟数は時間経過に伴って規模が分かかっていくが、経過途中の値は使わず、最終的な報告の棟数を用いる。本研究では、平成 28 年熊本地震における災害廃棄物処理の記録に記載されている住家被害建物棟数 (付録 表 2-1) を解体建物棟数の推計式 (5-1) に入力する。解体建物棟数の推計式 (5-1) に各自治体の住家被害建物棟数を入力して推計した結果、対象 8 市町村の解体建物棟数の推計値の合計は、31,316 棟となり、実績の 26,996 棟の 116% となった。市町村別の解体建物棟数の推計値と実績を図 5-4 に示す。

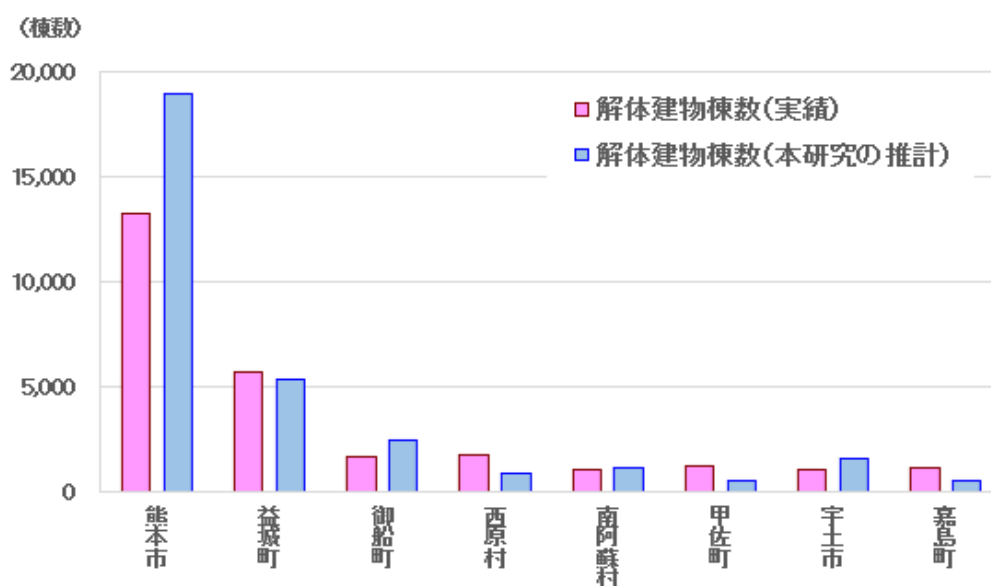
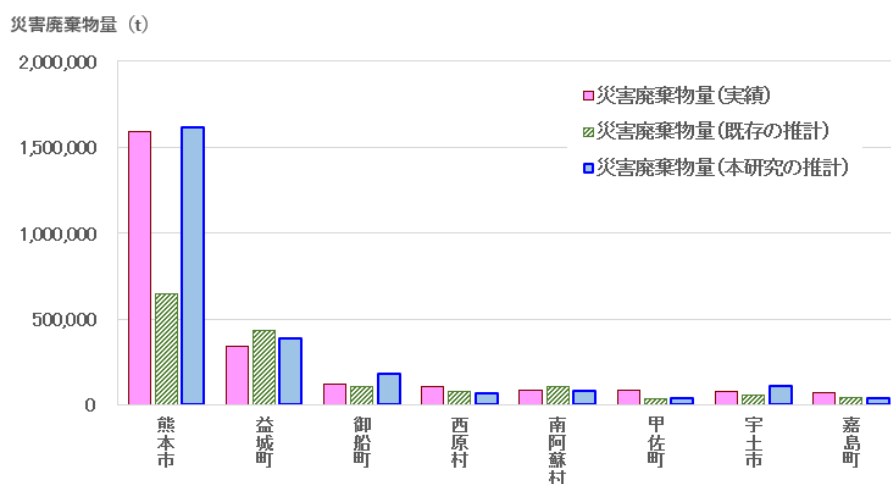


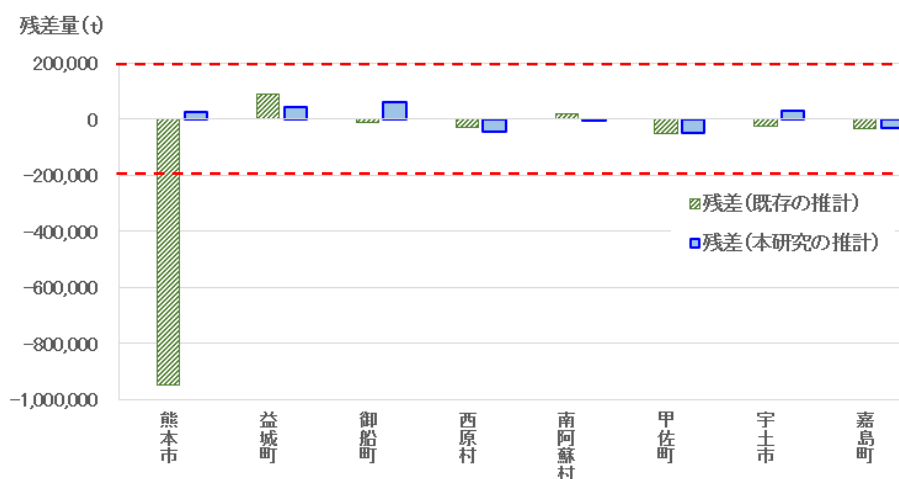
図 5-4 対象 8 市町村の解体建物棟数の実績と推計棟数

5.4.3 自治体の住家被害建物棟数による災害廃棄物発生量の推計と実績

熊本地震で被害を受けた各市町村の住家被害建物棟数を入力値として、災害廃棄物発生量を推計する。本研究の推計式 (5-1) と式 (5-2) によって推計した災害廃棄物発生量は、対象 8 市町村の合計で約 252 万 t となり、実績約 248 万 t とほぼ同じ値を得た。既存の災害廃棄物量推計式 (1-1) による災害廃棄物量 (推計) の対象 8 市町村の合計は約 150 万 t であった。したがって、本研究の目的の一つ、対象 8 市町村の災害廃棄物量推計値の合計が既存の推計方法より実績に近いことを満たしている。8 市町村それぞれの災害廃棄物量について、既存の推計値、本研究の推計値及び実績値を図 5-5 (a) に、災害廃棄物量推計値と実績値との残差を図 5-5 (b) に示す。熊本市における既存の推計値の残差が負の値で大きく外れているが、各市町村の本研究の推計値の残差は全て ±20 万 t 以内であることが明らかである。



(a)



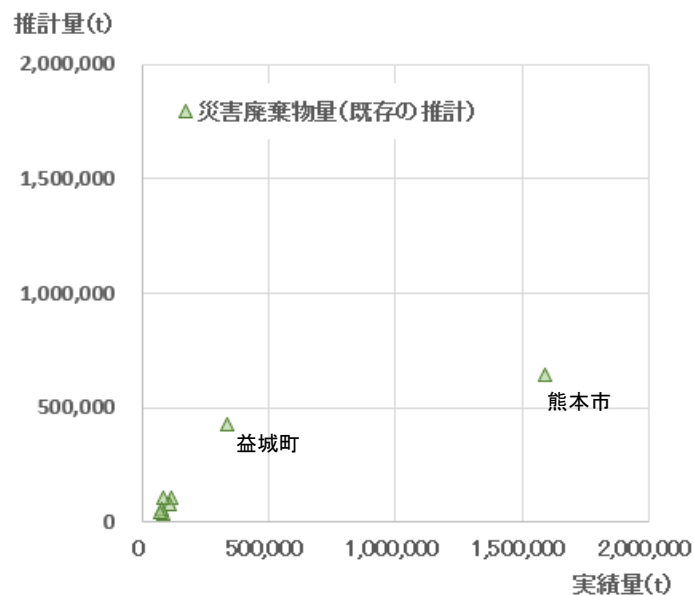
(b)

図 5-5 市町村別の災害廃棄物量の実績と既存の推計と本研究の推計
(a) 実績と既存の推計と本研究の推計; (b) 既存の推計と本研究の推計の残差;

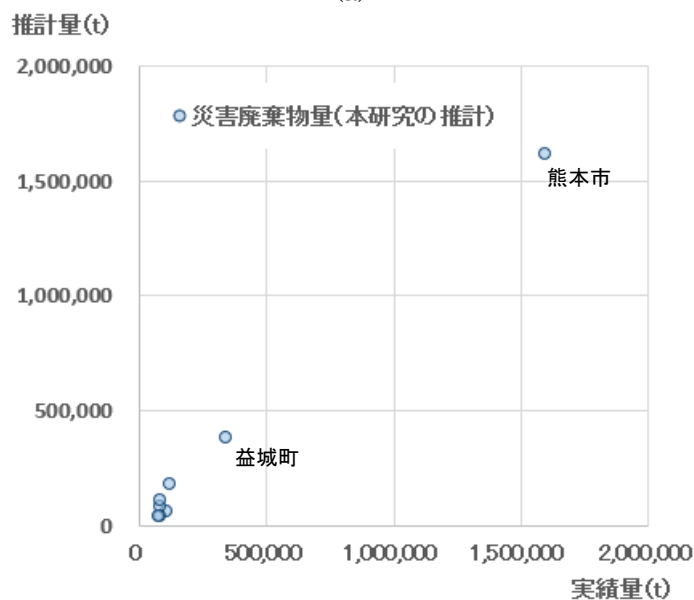
第 5 章 熊本地震における解体率を用いた災害廃棄物発生量の推計と実績の比較

また、既存の推計値と実績値との相関、並びに本研究の推計値と実績値との相関を図 5-6 で比較すると、熊本市で既存の推計値が実績より小さい値であり、本研究の推計結果の方がより高い相関があることが明らかである。以上により、第 1 章で挙げた次の 2 つの条件を満たし、本研究の目的を達成したといえる。

- ・ 8 市町村の各災害廃棄物量の残差が ±20 万 t 以内
- ・ 8 市町村の災害廃棄物量推計値の合計が既存の推計方法より実績に近い



(a)



(b)

図 5-6 災害廃棄物量の実績に対する既存の推計と本研究の推計の相関
(a) 既存の推計の相関；(b) 本研究の推計の相関；

既存の推計方法より本研究の推計方法の精度が向上していることを示すことができたが、市町村別に本研究の推計値と実績を比較すると、残差の大きい市町村がいくつかある。災害廃棄物量の推計値の過多・過少は、解体建物棟数の推計値に比例する。そこで、災害廃棄物量の推計値が実績より過多である御船町と宇土市、並びに過少である西原村、甲佐町と嘉島町について、被害棟数と解体建物棟数の実績と本研究の推計値を並べて図 5-7 に示した。図 5-7 (a) の御船町と宇土市の被害建物棟数の内訳をみると、全壊建物棟数が数百棟程度であることに対して、一部損壊建物棟数が数千棟と多い。内閣府の被害認定基準運用指針によると、損壊率 20%未満の建物が一部損壊と判定され、被害の程度には幅があり、損壊率が小さい建物も多いと予想される。本研究では、益城町の建物データベースによって一部損壊建物から約 10%の解体建物が発生すると推計したが、御船町と宇土市では損壊率が小さく、解体に至る建物が少なかったと推察する。一方、図 5-7 (b) から、西原村、甲佐町、嘉島町のいずれも、全壊と半壊の合計値を解体建物棟数の実績値が上回っていることがわかる。甲佐町の平成 28 年熊本地震及び豪雨災害記録誌²⁾によると、2016 年 7 月の時点で住家 285 棟、非住家 269 棟の解体申請があった記録がある。西原村の罹災手当金に関するホームページ³⁾には、住家と同一敷地内に建てられた非住家建物 1 棟も申請を受け付ける旨の記述がある。嘉島町ではこのような記述はみつけられなかったが、西原村、甲佐町、嘉島町は、2016 年 5 月の段階で、熊本県に災害廃棄物処理の事務手続きを委託している。こういった状況から、非住家建物の解体申請を多く受け付ける運用がなされたと推測する。一方、本研究の解体建物棟数を推計する式においては、建物係数で非住家建物も含めて解体棟数を推定したが、統計データでは住家の 2 倍となる建物係数を算出できていない。そのため、解体建物棟数の推計値が過少になったと考える。

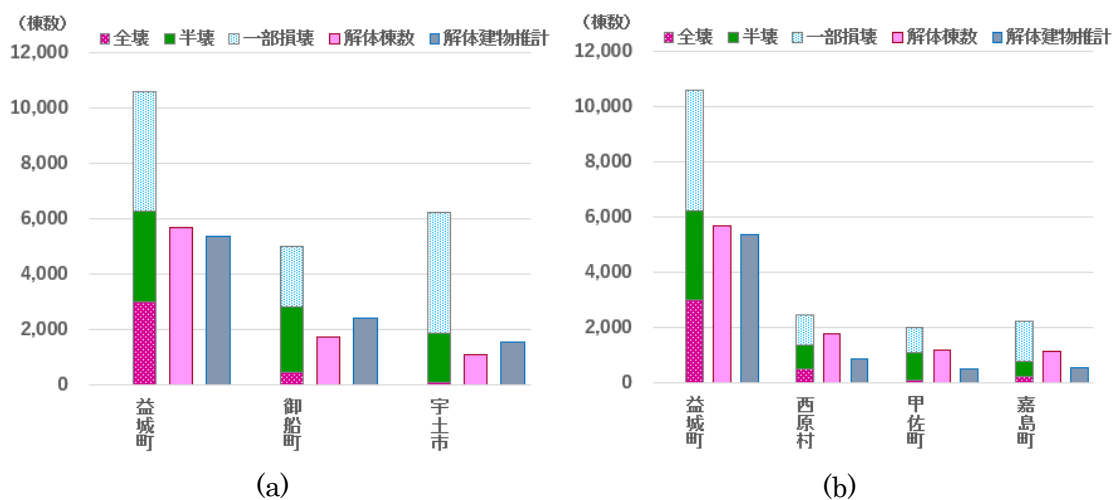


図 5-7 被害建物棟数と解体建物棟数（実績）と本研究の解体建物棟数（推計）

(a) 本研究の推計が実績より多い御船町と宇土市；

(b) 本研究の推計が実績より少ない西原村と甲佐町と嘉島町；

図 5-8 は、提案した災害廃棄物量推計式 (5-1) 及び式 (5-2) に使った各係数が、既存

の推計方法に比べて、災害廃棄物の推計量の増減どちらに影響を与えたか考察した結果を示したものである。

- ・解体建物棟数は、一部損壊、建物係数を考慮したことで、増加
- ・全壊の解体率が 85% となったことで、減少
- ・構造と原単位は、原単位が小さい木造の割合が多いことで、減少

第 1 章で述べたように、熊本地震発生後 1 か月半後に、既存の推計方法では推計値が過少であった。既存の推計方法より本研究の推計精度が向上したのは、増加要因である住家以外の建物及び一部損壊の解体建物を加えたことが寄与していると考えられる。

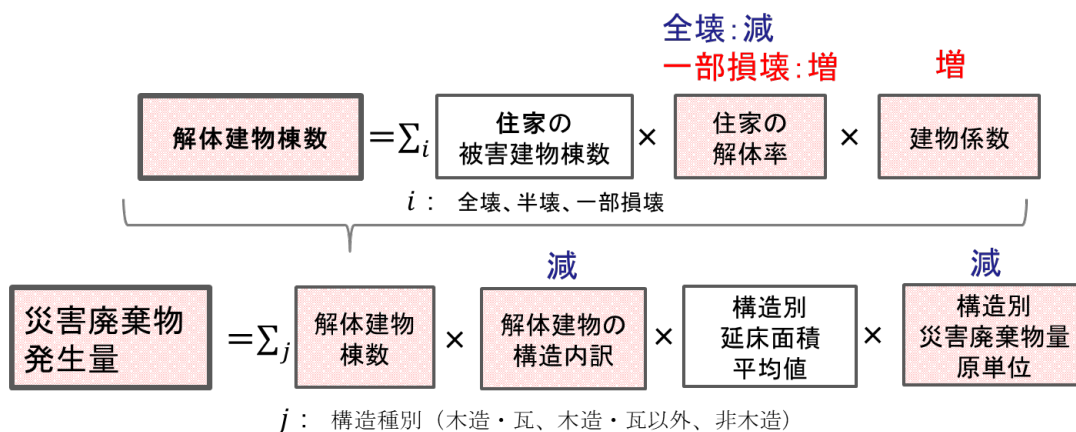


図 5-8 災害廃棄物量推計式の係数の増減影響

5.4.4 災害廃棄物量推計式における係数の変化による推計量への影響

解体建物棟数の推計式 (5-1) と災害廃棄物量の推計式 (5-2) において、本研究の益城町の分析結果及び住宅統計から係数を求めたものの、各市町村の運用等によって変動する可能性がある。本研究の推計と実績を比較した対象 8 市町村において、推計式の係数の変動による災害廃棄物量の変化率を表 5-5 に示す。

表 5-5 災害廃棄物量推計式の係数の変動による災害廃棄物量の変化率

推計式	係数	災害廃棄物量の変化率
解体建物棟数の推計式 (5-1)	Da_i : 被害別解体率	全壊の解体率+1%加算毎に + 7,215 (t)
		全壊の解体率+1%加算毎に + 25,356 (t)
		一部損壊の解体率+1%加算毎に +114,616 (t)
災害廃棄物量の推計式 (5-2)	Dc_j : 解体建物の構造内訳	RC 造の構造割合+1%加算毎に +353,421 (t)
	De_j : 災害廃棄物量原単位	木造原単位+0.1 (t/m ²) 毎に + 38,391 (t)

既往の推計方法では一部損壊からの解体建物を考慮していなかったが、一部損壊の解体率が災害廃棄物量に大きく影響していることが分かる。解体建物の RC 造の割合が増えると、災害廃棄物量が大きく増えることが分かる。本研究では木造の割合が全国平均に近い益城町で構造内訳を分析したが、木造の割合が小さい地域において解体建物の構造内訳が変わる可能性があり、今後注意する必要がある。災害廃棄物量原単位について、モデル解体調査の変動幅であれば、災害廃棄物量には影響が少ないことが分かる。以上をまとめると、一部損壊の解体率と解体建物の構造内訳が災害廃棄物量の変動に与える影響が大きいと言える。

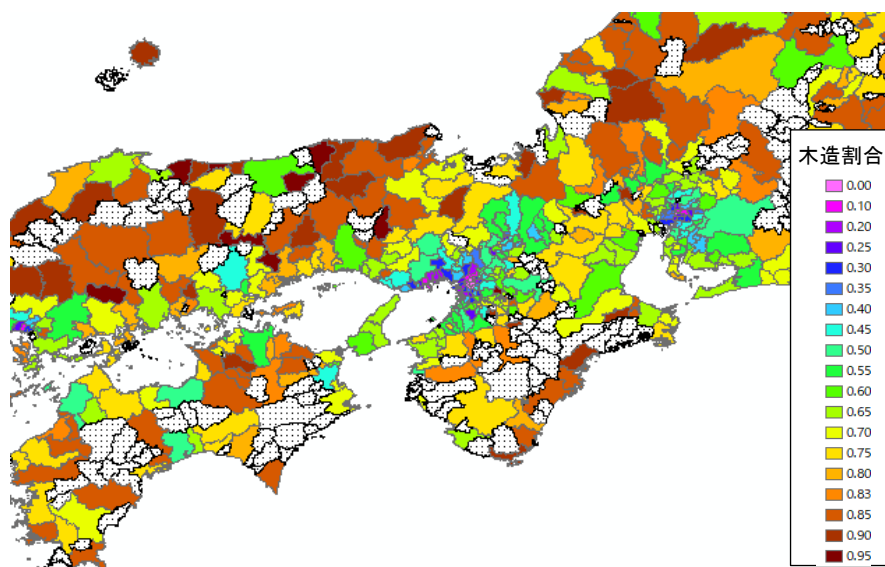
5.4.5 大規模な地震における利用想定と適用限界

日本で想定されている大規模な地震は、南海トラフ地震と首都直下地震である。熊本地震で、数万 t 以上の災害廃棄物が発生したのは震度 6 強以上の市町村であった。中央防災会議の南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループの想定震度分布⁴⁾で 6 強以上の範囲が広い県は、静岡、愛知、和歌山、高知、愛媛である。それぞれの地震で強い揺れが想定されている地域の木造建物の割合を図 5-9 (a) に示す。愛知県の名古屋市以外は、木造建物の割合が 50%以上の自治体が多いことが分かる。例えば、静岡県の自治体の木造建物の割合の平均は 63%であり、熊本県の平均 65%と近い傾向であるため、本研究の結果の解体建物の構造内訳を適用できると考える。一方、首都直下地震では、6 強以上の強い揺れが想定されるのは都心部であり、その木造建物の割合の分布を図 5-9 (b) で見ると、木造建物の割合が 40%以下の自治体が多い。本研究では、非木造の解体率及び木造建物の割合の小さい地域での解体建物の構造内訳を分析できていないため、首都直下地震に適用することは難しいが、南海トラフの震度 6 強以上の地域での揺れによる災害廃棄物量の推計には適用できると考える。

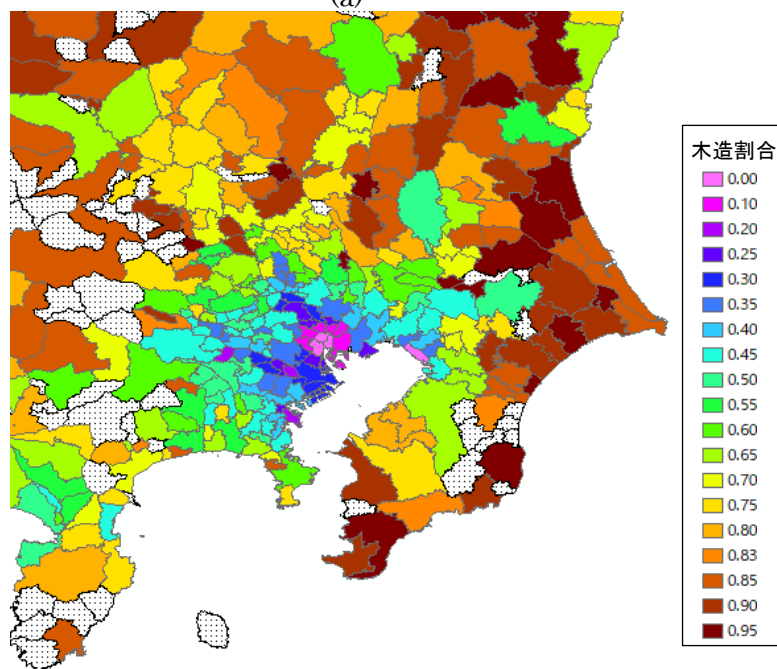
そこで、南海トラフ地震で強い揺れが想定される県の一つ、静岡県で災害廃棄物量を推

第 5 章 熊本地震における解体率を用いた災害廃棄物発生量の推計と実績の比較

計する。静岡県で想定されている全壊建物棟数は約 208,000 棟であり、フラジリティカーブの損傷率、住宅・土地統計と熊本地震の被害判定の割合から、表 5-6 の被害建物棟数を設定し、災害廃棄物量を推計した。また、各市町村別の災害廃棄物量を図 5-10 に示す。



(a)



(b)

図 5-9 南海トラフ地震と首都直下地震の想定被害地域の木造建物の割合の分布
(a) 南海トラフ地震の想定被害地域；(b) 首都直下地震の想定被害地域。

第5章 熊本地震における解体率を用いた災害廃棄物発生量の推計と実績の比較

表 5-6 南海トラフ地震を想定した静岡県の被害建物と解体建物と災害廃棄物量

	全壊	半壊	一部損壊	解体建物	災害廃棄物(t)
静岡県	207,981	207,981	238,768	259,108	28,446,170

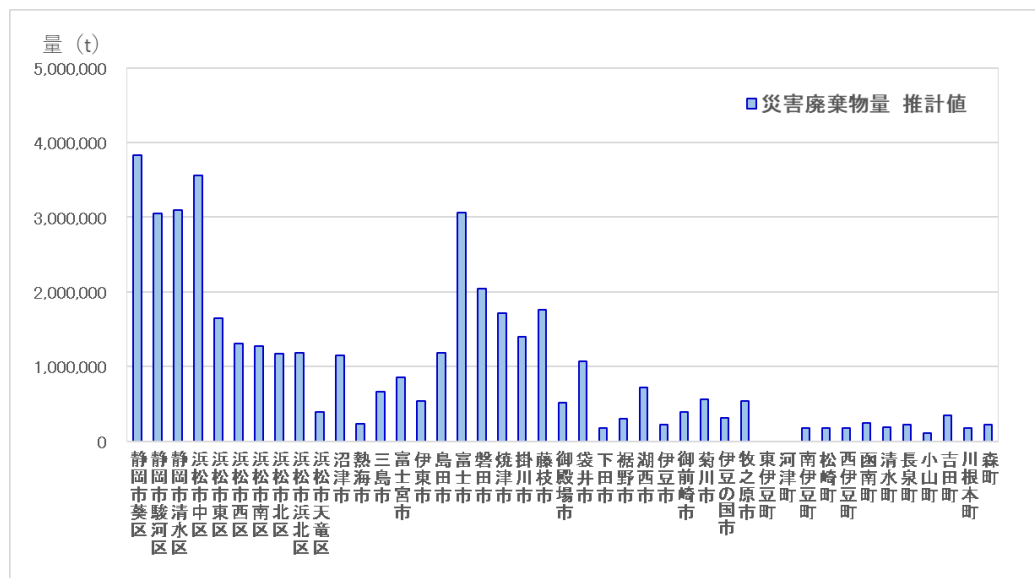


図 5-10 南海トラフ地震を想定した静岡県の市町村別の災害廃棄物量

南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループで想定した静岡県の災害廃棄物量は、東海地方で被害が大きくなるケースで約 2,800 万 t である (2,500~3,000 万 t の変動幅)。ワーキンググループの結果は、半壊と一部損壊からの解体を考慮していないが、本研究の成果は、半壊と一部損壊からの解体建物を組み入れている。第1章で述べたように、被害が甚大で、災害等廃棄物処理事業の補助制度を適用する際には、各市町村の災害廃棄物量の推計根拠及び二次仮置場に要求される災害廃棄物処理量を適切に見積る必要があり、本研究の実験結果は、熊本地震で被害が甚大であった 8 市町村で確認した推計方法に基づいて、半壊及び一部損壊からの解体建物が生じる割合を勘案して災害廃棄物量を推計できいるため、有用な情報になり得ると考える。

5.5 地震後被害速報を利用した災害廃棄物発生量推計の実験

自治体の現地調査によって被害建物棟数の規模を把握するのに1か月以上かかることがあると序論で述べた。地震発生後に被害建物の規模を把握する方法として、地震後初期に配信される REIC 速報の被害建物棟数を使い、災害廃棄物量がどの程度の規模で推計できるか実験してみる。自治体の被害建物棟数を入力したのと同様に、REIC 速報の被害建物棟数を入力して、解体建物棟数と災害廃棄物発生量を推計し、実績値と比較を行う。

5.5.1 被害速報の被害建物棟数による解体建物棟数の推計

REIC 速報の被害建物棟数を使うことによって、より早く解体建物棟数及び災害廃棄物発生量を推計できる可能性がある。REIC が配信している被害速報について WEB API 仕様書^④の被害建物に関する仕様を確認した。WEB API 仕様書には、行政区別の全壊棟数、全半壊棟数、被害なし棟数が提供されると記述がある。REIC 速報によって、全壊建物棟数と半壊建物棟数は提供されることは分かったが、一部損壊建物棟数が含まれていない。益城町では、一部損壊建物からも一定割合解体されることが分かっていることから、一部損壊建物棟数を推計式に入力する必要がある。そこで、REIC 速報の全半壊棟数推計値と実際の被害建物棟数の回帰分析を行い、一部損壊棟数を推定することを検討した。回帰分析の結果、図 5-11 に示すように、自治体の住家被害建物棟数の合計値が REIC の全半壊棟数の約 2.17 倍となる 1 次の近似式で推定でき、相関係数は 0.997、P 値も 0.01 未満であった。

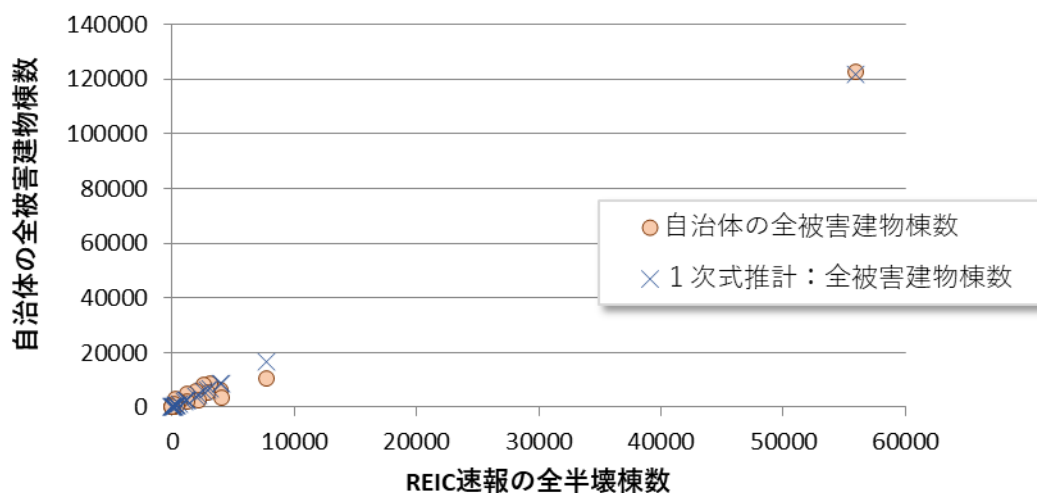


図 5-11 REIC 速報の全半壊棟数推計値と実際の被害建物棟数の相関

自治体の全被害建物棟数、REIC 速報の全半壊建物棟数及び一部損壊建物棟数推定値との関係は式 (5-3) と式 (5-4) の関係が成り立つ。

第5章 熊本地震における解体率を用いた災害廃棄物発生量の推計と実績の比較

$$DY_r = DX_{r1+r2} + DX_{r3} \quad \dots\text{式 (5-3)}$$

$$DY_r = DX_{r1+r2} \times 2.17 \quad \dots\text{式 (5-4)}$$

ここで、 DY_r ：自治体の全被害建物棟数（棟）

DX_{r1+r2} ：REIC 速報の全半壊建物棟数（棟）

DX_{r3} ：一部損壊建物棟数推定値（棟）

したがって、一部損壊建物棟数の推定値は式（5-5）により計算される。

$$DX_{r3} = DX_{r1+r2} \times 1.17 \quad \dots\text{式 (5-5)}$$

熊本地震後配信された REIC 速報の全壊棟数、半壊棟数並びに式（5-4）から求めた、8 市町村の一部損壊棟数の推定値を表 5-7 に示す。

表 5-7 REIC 速報の全壊・半壊棟数と一部損壊建物棟数の推定値

	市町村	REIC 速報		式 (5-6) の一部損壊 建物棟数推定値
		全壊棟数	半壊棟数	
1	熊本市	16,679	39,291	65,485
2	宇土市	1,062	2,869	4,599
3	南阿蘇村	205	874	1,262
4	西原村	987	1,135	2,483
5	御船町	245	995	1,451
6	嘉島町	322	895	1,424
7	益城町	4,033	3,707	9,056
8	甲佐町	95	477	669

表 5-7 の REIC 速報の全壊・半壊棟数と一部損壊建物棟数推定値を解体建物棟数の推計式（5-1）に入力し、対象とした 8 市町村の解体建物棟数（推計）を計算した。解体建物棟数を推計する際、REIC 速報の被害建物棟数は住家以外の被害建物も含んでいるので、式（5-1）の建物係数 Db は乗じていない。解体建物棟数（実績）と比較するため、速報を使って推計した解体建物棟数と実績値を図 5-12 に示す。

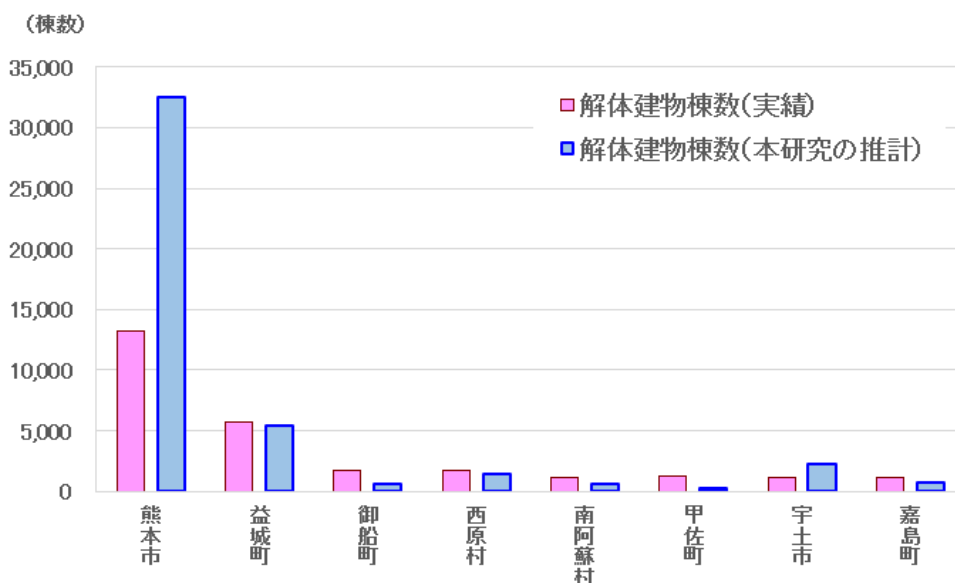


図 5-12 対象 8 市町村の解体建物棟数の実績と速報を使った推計棟数

速報の被害建物棟数を使って推計した解体建物棟数と実績を比較すると、熊本市の解体建物棟数に大きく差があることが分かる。REIC 速報の被害建物棟数を使って推計した解体建物棟数の 8 市町村の合計は 26,996 棟となり、実績値合計 13,755 棟の約 2 倍となった。これは、REIC 速報の被害建物棟数と自治体の住家被害建物棟数、特に全壊棟数に差があることが原因である。REIC 速報の全壊建物棟数と自治体の全壊建物棟数を図 5-13 に示す。特に、熊本市の全壊建物棟数 2,456 棟に比べて、REIC 速報の全壊建物棟数が 16,679 棟と約 6.8 倍であり、住家以外の被害建物を含んでいるとしても、かなり大きな数値であることが解体建物棟数の推計の上振れに影響したと考えた。

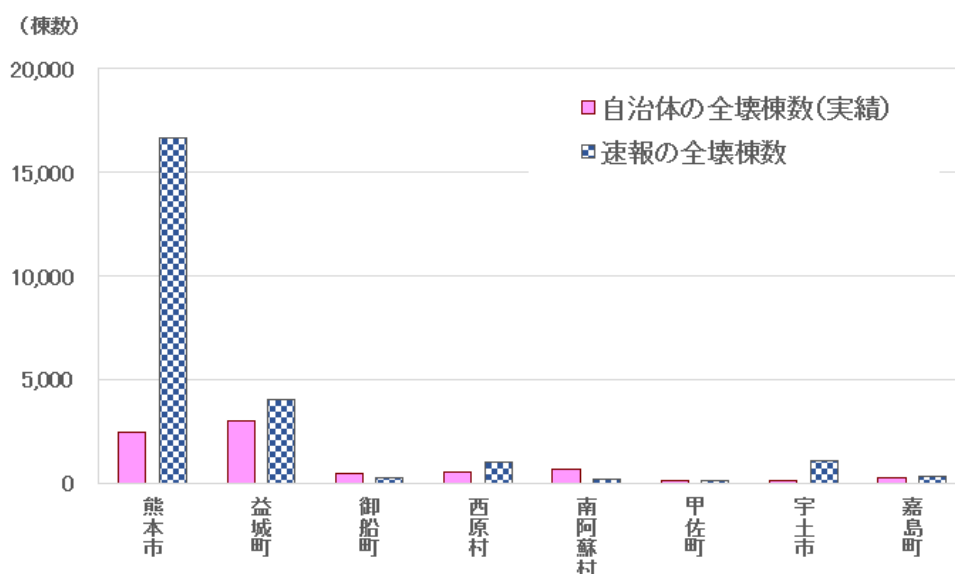
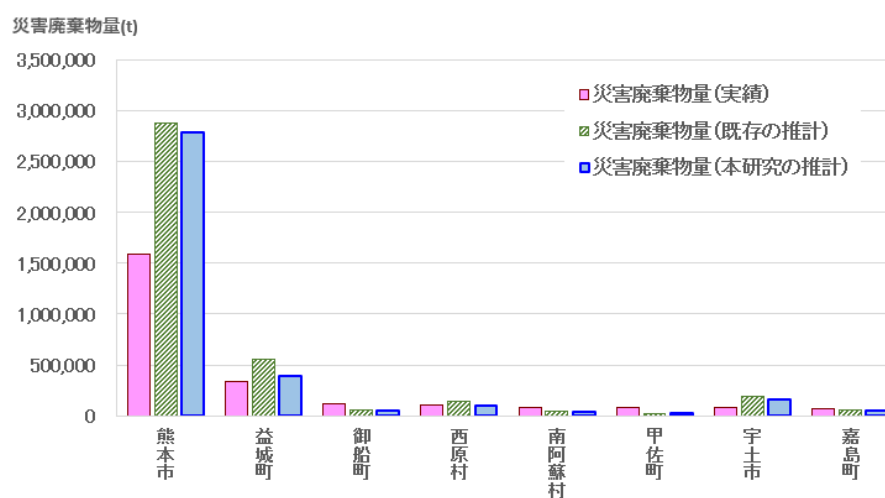


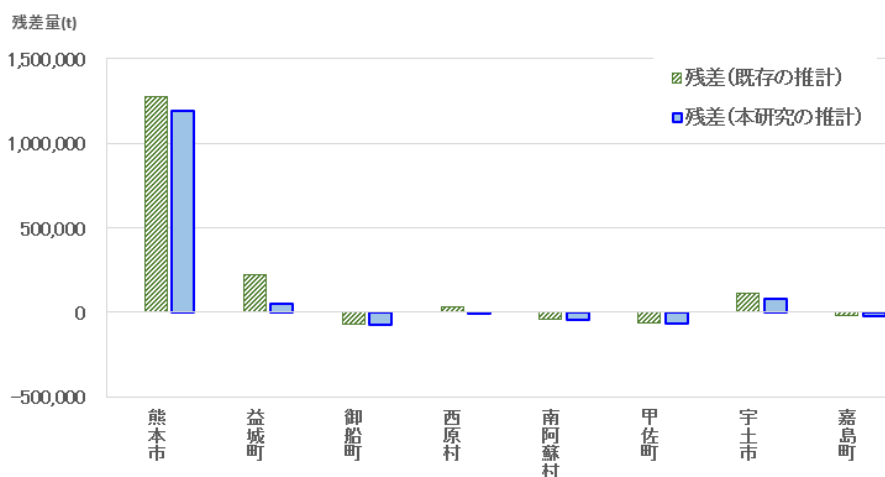
図 5-13 REIC 速報の全壊建物棟数と自治体の全壊建物棟数

5.5.2 被害速報を利用した災害廃棄物発生量の推計の実験

速報の被害建物棟数が多いことで解体建物棟数の推計が大きくなったことが分かったが、既往の推計方法と本研究の推計方法の入力条件としては同じであるため、速報の被害建物棟数を入力して災害廃棄物を推計した結果、本研究で推計した結果は約 430 万 t となった。既往の推計式 (1-1) に入力して計算した災害廃棄物発生量 (推計) も同規模の約 460 万 t となった。熊本地震で被害を受けた各市町村において、REIC 速報の被害建物棟数を既往の災害廃棄物推計式 (1-1) に入力して計算した災害廃棄物発生量 (推計)、本研究の推計式 (5-1) と式 (5-2) により計算した災害廃棄物発生量 (推計)、並びに災害廃棄物処理量 (実績) を図 5-14 (a) に示す。また、図 5-14 (b) には、その残差を示す。



(a)



(b)

図 5-14 市町村別の災害廃棄物量の実績と速報を使った既存と本研究の推計
(a) 実績と既存の推計と本研究の推計; (b) 既存の推計と本研究の推計の残差。

速報を使った災害廃棄物量の推計値について、対象とした8市町村の合計の実績約248万tに対して、既存の推計方法で約394万t、本研究の推計方法では約360万tであり、どちらも実績値の1.5倍程度と大きく上回った。これは速報の各市町村の被害建物棟数が実際より大きく、解体建物棟数（推計）の合計が約1.5倍と大きく上回ったことが原因と考える。本研究ではREIC速報の被害建物棟数の推計精度を調査研究対象にしておらず、速報値自体の改善が望まれる。REIC速報の被害建物棟数の推計精度に問題点があるものの、地震後の速報により被害建物棟数の規模と災害廃棄物発生量を百万t程度の量規模を把握することには有用になると考える。数時間か数日で推計する仕組みとして有効な手段となり得るため、問題点及び推計精度があることを認識した上で利用することも一案である。

5.6 本章のまとめ

熊本地震による被害が甚大であった対象8市町村において、本研究で提案した推計方法による災害廃棄物発生量の推計値と実績値の比較結果及び考察をまとめる。第4章で求めた解体率と住宅統計等から算出した建物係数を用いて、対象8市町村の住家の被害建物棟数を入力して、解体建物棟数を推計した。第3章で求めた災害廃棄物量原単位、第4章で求めた解体建物の構造内訳を係数とし、推計した解体建物棟数を入力して、災害廃棄物発生量を推計した結果、対象8市町村の実績値の合計約250万tとほぼ同じ値となった。各市町村の推計値と実績値の相関をみても、本研究による推計値の方が既存の推計結果に比べて推計精度が向上していることを明らかにした。ただし、非住家の解体が多い市町村では推計値が過少となること、並びに全壊判定が少なく一部損壊建物判定が多い市町村では一部損壊建物からの解体建物棟数の推計が過多になることに注意が必要である。

本研究で提案した災害廃棄物発生量推計式に用いた係数について増減要素を分析した。本研究の推計方法においては、既存の推計方法にはない一部損壊建物の解体率及び住家以外の解体建物を組み入れたことが寄与し、災害廃棄物発生量の推計精度が向上したと考える。また、推計式に用いた係数の変動による災害廃棄物量の変化を分析し、一部損壊の解体率と解体建物の構造内訳の変動による災害廃棄物量の変化率が大きいことを示した。本研究の推計方法の利用可能性を示すために、南海トラフ地震で強い揺れが想定される静岡県を例として、災害廃棄物量を推計した。被害が甚大で、災害等廃棄物処理事業の補助を適用する場面では、災害廃棄物量の推計根拠及び二次仮置場に要求される災害廃棄物処理量を適切に見積る必要がある、本研究の実験結果は、半壊及び一部損壊からの解体建物が生じる割合を勘案して災害廃棄物量を推計できるため、有用になると考える。一方、首都直下地震で強い揺れが想定される都心部は、木造建物の割合が低い地域であり、解体建物の構造の内訳を分析することが今後の課題である。

また、REIC速報の被害建物棟数も入力し、どの程度実績に近く推計できるか実験を行った。REIC速報の被害建物棟数が市町村の住家被害棟数に対してかなり大きな値であることが影響して、既存の推計値及び本研究の提案の災害廃棄物発生量も実績の約1.5倍と大きく上回った。被害建物棟数の推計精度に問題点があるものの、地震直後に被害建物棟数の規模を知り、数時間か数日程度で災害廃棄物発生量を推計する仕組みとして有効な手段になると考える。

参考文献(第5章)

- [1] 熊本市建築計画課:平成 24 年度熊本市分譲マンション実態調査報告書, 2013 年 3 月.
https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=2708&sub_id=7&flid=48268
- [2] 甲佐町:平成 28 年熊本地震及び豪雨災害記録誌, 2018 年 8 月.
<https://www.town.kosa.lg.jp/q/aview/102/3459.html>
- [3] 西原村:西原村罹災手当金等について, 2016.
https://www.vill.nishihara.kumamoto.jp/oshirase/_2180.html(参照 2022 年 1 月 9 日)
- [4] 内閣府:南海トラフ巨大地震の被害想定(第二次報告)について, 2019 年 6 月.
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html(参照 2022 年 1 月 9 日)
- [5] 特定非営利活動法人リアルタイム地震・防災情報利用協議会:WWW.REIC-RTC 情報配信 WEB API 仕様書, 2019.

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

2016年熊本地震の後、損傷した建物を解体し、災害廃棄物として処理するため、災害廃棄物処理計画が策定され、計画策定時に既往の推計方法で計算した災害廃棄物発生量は過少であり、約2年後の実際に処理された災害廃棄物量は1.5倍であった。既往の災害廃棄物発生量の推計式では被害建物棟数に災害廃棄物量原単位を乗じているため推計と実績の差が生じていると考え、解体率を用いて解体建物棟数を推計し災害廃棄物発生量推計する方法を提案した。提案する災害廃棄物量の推計式の係数を求めるため、益城町の解体建物の建物データベースを作成し、解体率、解体建物の構造内訳、災害廃棄物発生量原単位等を算出した。算出した結果を使って災害廃棄物発生量を推計し実績との比較を行った。各章では次の結論を得た。

第2章では、益城町の解体建物の建物データベースを作成した。益城町の全建物約16,000棟について、衛星画像とGISの建物輪郭情報を用いて、熊本地震以降の解体建物と現存建物に識別した。衛星画像を目視判読による解体と現存の識別を支援するために、衛星画像で解体されている可能性の高い箇所を示す指標を作成した。熊本地震後の2016年4月から2018年3月までの間に、約5,700棟の建物が解体されたことを確認した。全ての解体建物に対して、全壊、半壊等の被害判定結果の有無並びに建物構造、屋根種類、延床面積等の建物情報を関連付けて、建物データベースを完成した。

第3章では、益城町の災害廃棄物処理量（実績）と全ての解体建物の棟数、構造種別、延床面積によって、災害廃棄物量原単位を算出した。熊本地震後の益城町の災害廃棄物処理量の実績データを収集し、解体建物に由来する災害廃棄物処理量を整理した。解体建物延床面積と処理量の実績値の関係式により、構造別・組成別の延床面積当り解体建物由来の災害廃棄物量原単位を推計した。延床面積当り災害廃棄物量原単位（推計）は、瓦屋根木造建物の場合0.57 (t/m²)、瓦屋根以外の木造建物の場合0.51 (t/m²)と結果を得た。木造建物の組成を木くず、コンクリート、瓦、金属くず、その他に分けて災害廃棄物量原単位（推計）も推計した。解体建物の従来かなりの重量を占められていた瓦について建築面積当り災害廃棄物量原単位0.06 (t/m²)と推計した。非木造、特にRC造とCB造の解体建物棟数が少なかったため、本研究では非木造の災害廃棄物量原単位を推計できなかったが、構造の割合が多い木造については災害廃棄物発生量推計式に適用する、延床面積当り災害廃棄物量原単位を得た。

第4章では、解体建物の解体率と構造内訳を求めた。益城町の全解体建物の建物データベースから、災害廃棄物発生量推計式の係数の一つである、被害別の解体率を算出し、全壊建物の約85%、大規模半壊と半壊建物の約30%、一部損壊建物の約10%が解体されていることを示した。また、被害と建築年代別の解体率を分析し、同じ被害判定でも建築年代が新しいほど解体率が低くなる傾向を示したが、解体建物棟数に占める割合が少ないことから、建築年代別に細分化した解体率を取り込まないこととした。一方、自治体の報告による被害建物棟数は、住家を対象にしている。住家以外の建物が被害判定されないまま

解体される建物もあるため、解体建物棟数の推計方法は、自治体の住家被害建物棟数から求めた解体建物棟数に建物係数を乗じて住家以外も含む解体建物棟数を求めることを提案し、益城町の実際の解体建物棟数に近い値で推計できることを確認した。また、益城町の建物データベースに格納されている建物構造と延床面積から、解体建物の構造内訳を算出し、瓦屋根の木造建物、瓦以外の木造建物が75%、13%、LS造/S造,その他, RC造/CB造の順で、6%、5%、1%と求めた。益城町の解体建物の建物データベースから災害廃棄物発生量推計式に必要な係数を得られたため、求めた係数と非木造（RC造）の災害廃棄物量原単位には熊本地震モデル解体調査の値を使って益城町の災害廃棄物量を推計した結果、実績値に近い値で推計できることを明らかにした。

第5章では、益城町以外の市町村において、提案した災害廃棄物発生量の推計方法によって災害廃棄物発生量を推計し、実績との比較を行った。第3章で求めた災害廃棄物量原単位、第4章で求めた解体率と解体建物の構造内訳を推計式の係数とし、被害が甚大であった8市町村（熊本市、宇土市、御船町、南阿蘇村、益城町、西原村、甲佐町及び嘉島町）の住家被害建物棟数を入力して災害廃棄物量を推計した結果、既往の推計結果に比べて実績との相関が高く、市町村別の残差も設定した要求精度以内であることを示した。ただし、非住家の解体が多い市町村や全壊建物が少なく一部損壊建物が多い市町村では、災害廃棄物量推計値の過少・過多が生じる場合がある。本研究で提案した災害廃棄物発生量推計方法は、一部損壊建物の解体率及び住家以外の解体建物を推計する建物係数を組み入れて解体建物棟数を推計したことにより、災害廃棄物発生量の推計精度が向上したと考える。また、本研究の災害廃棄物量推計式の係数の中で、一部損壊の解体率と解体建物の構造内訳の変化が災害廃棄物量の変動に与える影響が大きい。

本研究の推計方法の利用可能性を示すために、南海トラフ地震による揺れが想定される地域で、一部損壊建物の解体と構造内訳も考慮した災害廃棄物量を推計した。災害等廃棄物処理事業の補助制度を適用する際には災害廃棄物量の推計根拠を示す必要があり、本研究結果は有用な情報になり得る。一方、首都直下地震で強い揺れが想定される都心部は、木造建物の割合が低い地域であり、解体建物の構造の内訳を分析することが今後の課題である。また、REIC速報の被害建物棟数を推計式に入力し、災害廃棄物発生量をどの程度規模で推計できるか実験を行った。既存の推計方法でも本研究の推計方法でも災害廃棄物量が実績値の約1.5倍と大きく上回った。REIC速報の被害建物棟数の推計精度に問題点があるものの、大規模な地震発生後に災害廃棄物処理計画を立案する際、早く災害廃棄物発生量を推計する仕組みとして可能性を示せたと考える。

6.2 課題と適用範囲

益城町の解体建物は、ほとんど木造建物であったため、第3章で、益城町の木造の解体建物の災害廃棄物量原単位を算出することができた。しかし、解体建物の非木造の割合が少なく、非木造建物の原単位を得られなかった。災害廃棄物発生量を推計した際、RC造については熊本地震モデル解体調査の値、LS造/S造については木造の原単位を適用した。また、既存の災害廃棄物発生量推計方法が掲載されている災害廃棄物対策指針【技 14-2】

において、非木造建物の災害廃棄物原単位は RC 造、LS 造、S 造等のような構造に区別されていない。非木造建物の原単位の調査はまだ少なく、今後も調査研究が求められる。

また、住宅統計によると、熊本地震で被害を受けた市町村の多くは木造建物の割合が益城町より高く、解体建物の構造内訳は益城町の分析結果を一律に適用し、実績値とほぼ同じ災害廃棄物量を推計できた。しかし、首都圏等で木造建物の割合が低い市区町村等に、本研究結果と同じ構造内訳を適用できるか確認していくことが必要である。

6.3 本研究成果の利用想定

本研究の災害廃棄物発生量の推計方法は既往の推計方法より推計精度が向上していることを示すことができた。災害廃棄物発生量を推計する場面は、第1章で述べたように、災害発生後の災害廃棄物処理計画策定時と大規模災害を想定した災害廃棄物処理計画の準備段階である。特に、災害発生後は、速報の被害建物棟数または現地調査による自治体の住家被害建物棟数をより早く情報収集することが不可欠になるが、本研究の災害廃棄物処理量推計式の中で用いた係数を事前に調査し準備しておくことで、備えることができる。具体的には、住家以外の建物総数と住家建物の比率、住宅・土地統計調査による平均延床面積、木造建物の割合等を調べておくことである。益城町の木造建物の割合は約60%であり、首都圏、政令都市、沖縄等を除けば、多くの地方自治体では、益城町と同等かそれ以上の木造建物の割合であり、本研究成果の解体建物の構造内訳をそのまま使うことも一案と考える。第5章で示したように、南海トラフのような強い揺れが予想され、木造建物の割合が多い地域では、災害等廃棄物処理事業の補助制度を適用する場面が想定され、本研究の災害廃棄物量の推計方法によって災害廃棄物量の推計根拠及び二次仮置場に要求される災害廃棄物処理量を示すことができるため、災害廃棄物処理計画策定に資することができる。各自治体の災害廃棄物処理計画策定状況の整備状況は環境省のホームページ^[1]で確認でき、事前の防災計画を検討途中である自治体も少なくない。災害廃棄物処理計画策定や更新時に、本研究の分析結果や住宅統計等から予め係数を準備しておけば、災害廃棄物発生量の推計はエクセル等でも計算可能であり、推計に取りかかりやすい環境を用意しておくことも有用と考える。

参考文献(第6章)

[1] 環境省：災害廃棄物処理計画の策定状況, 2021年3月.

http://kouikishori.env.go.jp/strengthening_measures/formulation_status/ (参照 2021年9月22日)

本研究に関連した論文及び国際会議発表

本研究に関連した論文

[1] Kushiyama, Y., Matsuoka, M.: Time series GIS map dataset of demolished buildings in Mashiki town after the 2016 Kumamoto, Japan earthquake. *Remote Sensing*, Vol. 11, No.19, pp.1-27, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11192190>

[2] 串山傳, 松岡昌志, 井ノ口宗成, 堀江啓: 2016年熊本地震の益城町における解体建物由来の災害廃棄物量原単位推定, *廃棄物資源循環学会*, 第32巻, pp.51-64, 2021.

<https://doi.org/10.3985/jjsmcwmm.32.51>

国際会議発表

[1] Kushiyama, Y., Matsuoka, M., Miura, H., Ogushi, F.: Relationship between SAR intensity and aspect angle of building considering scattering behavior. In *Proceedings of the 37th Asian Conference on Remote Sensing*, Colombo, Sri Lanka, Ab0325, 2016.

[2] Kushiyama, Y., Matsuoka, M., Inoguchi, M., Horie: Structural type and damage class of demolished buildings in Mashiki town after the 2016 Kumamoto earthquake, In *Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering*, Sendai, Japan, 8a-0007, 2020.

付録 1 解体建物の全数調査結果を使った画像解析指標の評価

画像解析指標の評価は 2.2.4 で一度行っているものの、益城町の解体建物の全数調査を行い識別した建物データベースを作成できたことから、全解体建物と全現存建物を正解データとして、精度評価を行ってみる。式(付 1-1)から式(付 1-5)に精度評価の式を示す。

$$Fmeasure = 2 (Recall \times Precision) / (Recall + Precision) \quad \dots \text{式 (付 1-1)}$$

$$Precision = TP / (TP + FP) \quad \dots \text{式 (付 1-2)}$$

$$Recall = TP / (TP + FN) \quad \dots \text{式 (付 1-3)}$$

$$Specificity = TN / (FP + TN) \quad \dots \text{式 (付 1-4)}$$

$$Accuracy = (TP + TN) / (TP + FP + FN + TN) \quad \dots \text{式 (付 1-5)}$$

3つの時期、2016年7月29日、2017年1月1日、2018年3月25日の衛星画像について、閾値を0.1刻みで変えていった時のF-measureを付録表1-1に示す。閾値が0.3の時にF-measureが最も高い。そこで、益城町のOSMデータの中から、指標の閾値を0.3にして解体建物と現存建物に分類した時の混同行列を付録表1-2～付録表1-4に示す。また、式(付1-1)から式(付1-5)による評価値を付録表1-5に一覧で示す。F-measureをみると、0.220、0.594、0.579と、あまり高い値ではない。2016年7月29日の画像の評価結果では、precisionが0.125と低い値である。目視判読では現存建物にもかかわらず、指標を用いた場合には解体建物と誤分類してしまい、FPの棟数が多くなったことを意味する。2017年1月1日と2018年3月25日の画像の評価結果では、recallの値が低くなり、目視判読では解体建物であるが、指標の閾値では現存建物と誤分類し、FNの棟数が増えている。Specificityはいずれの時期でも0.9以上、つまり、現存建物は指標による分類でも高い精度で正解していることを示している。本研究で提案した画像解析指標の閾値による分類手法は、現存建物を解体建物と誤分類する可能性は低い、解体建物を抽出できる割合が少ない傾向であることが分かった。

付録表 1-1 画像解析指標の閾値とF値の関係

閾値	2016年7月29日	2017年1月1日	2018年3月25日
0.0	0.748	0.743	0.688
0.1	0.887	0.908	0.780
0.2	0.940	0.955	0.864
0.3	0.965	0.962	0.920
0.4	0.954	0.942	0.906
0.5	0.922	0.911	0.857
0.6	0.900	0.842	0.778
0.7	0.675	0.659	0.571
0.8	0.533	0.429	0.429
0.9	0.226	0.167	0.226

付録表 1-2 画像解析指標の閾値を0.3にした場合の混同行列 (2016年7月29日)

		指標		
		解体	現存	計
判読	解体	218	16	234
	現存	1,532	14,125	15,657
	計	1,750	14,141	15,891*

*：影等に隠れて解体と現存を判読できなかった建物は含まない。

付録表 1-3 画像解析指標の閾値を0.3にした場合の混同行列 (2017年1月1日)

		指標		
		解体	現存	計
判読	解体	1,476	1,361	2,837
	現存	653	12,429	13,082
	計	2,129	13,790	15,919*

*：影等に隠れて解体と現存を判読できなかった建物は含まない。

付録表 1-4 指標の閾値を0.3にした場合の混同行列 (2018年3月25日)

		指標		
		解体	現存	計
判読	解体	2,682	3,019	5,701
	現存	882	9,268	10,150
	計	3,564	12,287	15,851*

*：影等に隠れて解体と現存を判読できなかった建物は含まない。

付録表 1-5 本研究の目視判読結果と益城町の報告の解体建物数比較

閾値	2016年7月29日	2017年1月1日	2018年3月25日
F-measure	0.220	0.594	0.579
Precision	0.125	0.693	0.753
Recall	0.932	0.520	0.470
Specificity	0.902	0.950	0.913
Accuracy	0.903	0.873	0.754

2.2.4 において、評価用データに対して、画像解析指標と閾値の ROC カーブを作成し、AUC が 0.9 以上であることから分類性能がよいことを確認したが、益城町の全ての建物の目視判読結果の解体建物と現存建物で評価すると F-measure が低い数値となってしまう。評価用データは 2016 年 7 月から 2018 年 3 月までのいずれの時期の画像でも解体されていることが確認されている建物であり、俯瞰的に見ても画像の明るさの変化で解体建物とわかりやすい建物を選択して評価したことが 2.2.4 ではよい性能を示したと考えられる。

しかしながら、解体建物判読の効率性の視点で考えた場合、2018 年 3 月 25 日の画像の解析指標の閾値で分類した正誤の結果をみると、誤分類となる建物数は全体 16,106 棟のうち 3,901 棟である。つまり、約 4 棟に 1 棟の頻度で訂正していることになる。建物輪郭データと衛星画像を用意し、約 100 棟の評価用データを作成して、分類性能評価等の作業手順を踏む必要があるが、約 16,000 棟の建物全てを一から目視判読することに比べると解体建物と現存建物を効率的に識別できる手法と考える。

付録 2 解体建物棟数及び災害廃棄物量の推計値一覧

5.4 項と 5.5 項において、熊本県の各市町村の住家被害建物棟数と速報の被害建物棟数を入力して、災害廃棄物量の推計を行った。入力した値及び推計値を付録表 2-1～2-5 に示す。

付録表 2-1 熊本地震による市町村の住家被害建物棟数

	市町村	全壊	半壊	一部損壊
1	熊本市	2,456	15,219	105,084
2	益城町	3,026	3,233	4,325
3	宇城市	539	2,396	5,662
4	御船町	444	2,397	2,177
5	大津町	154	1,372	3,800
6	西原村	512	865	1,096
7	菊池市	58	684	2,898
8	南阿蘇村	700	987	1,168
9	甲佐町	105	986	914
10	宇土市	116	1,750	4,344
11	嘉島町	234	565	1,458
12	阿蘇市	108	860	1,598
13	合志市	47	862	7,022
14	菊陽町	15	671	5,108
15	八代市	20	431	2,662
16	氷川町	35	194	804
17	美里町	19	284	694
18	玉名市	11	95	1,550
19	山都町	16	247	520
20	玉東町	14	146	291
21	産山村	12	46	180
22	南小国町	1	38	175
23	芦北町	0	4	39
24	小国町	0	1	135
25	和水町	0	33	100
26	南関町	1	2	82

付録表 2-2 各市町村の住家被害建物棟数から推計した解体建物棟数

	市町村	全壊	半壊	一部 損壊	建物 係数	解体建物 棟数 (推計)	解体建物 棟数 (実績)	残差
1	熊本市	2,456	15,219	105,084	1.10	18,878	13,241	5,637
2	益城町	3,026	3,233	4,325	1.35	5,366	5,702	▲ 336
3	宇城市	539	2,396	5,662	1.79	3,120	2,433	687
4	御船町	444	2,397	2,177	1.85	2,431	1,719	712
5	大津町	154	1,372	3,800	1.21	1,117	1,541	▲ 424
6	西原村	512	865	1,096	1.10	886	1,772	▲ 886
7	菊池市	58	684	2,898	1.93	1,050	1,309	▲ 259
8	南阿蘇村	700	987	1,168	1.10	1,109	1,100	9
9	甲佐町	105	986	914	1.10	524	1,221	▲ 697
10	宇土市	116	1,750	4,344	1.47	1,555	1,103	452
11	嘉島町	234	565	1,458	1.10	567	1,138	▲ 571
12	阿蘇市	108	860	1,598	2.00	1,020	900	120
13	合志市	47	862	7,022	1.16	1,161	628	533
14	菊陽町	15	671	5,108	1.10	798	433	365
15	八代市	20	431	2,662	1.54	634	293	341
16	氷川町	35	194	804	1.10	185	315	▲ 130
17	美里町	19	284	694	1.10	187	393	▲ 206
18	玉名市	11	95	1,550	1.81	349	174	175
19	山都町	16	247	520	2.00	280	121	159
20	玉東町	14	146	291	1.10	94	60	34
21	産山村	12	46	180	1.10	46	42	4
22	南小国町	1	38	175	1.10	33	23	10
23	芦北町	0	4	39	2.00	10	4	6
24	小国町	0	1	135	1.10	15	1	14
25	和水町	0	33	100	1.10	22	3	19
26	南関町	1	2	82	1.10	11	2	9
	合計	8,643	34,368	153,886		41,448	35,671	5,777

付録表 2-3 既存と本研究の災害廃棄物発生量（推計）と災害廃棄物処理量（実績）

	市町村	既存推計	残差	本研究推計	残差	実績
1	熊本市	643,477	▲ 949,284	1,618,898	26,137	1,592,761
2	益城町	429,694	90,521	383,373	44,200	339,173
3	宇城市	119,129	▲ 51,640	240,630	69,861	170,769
4	御船町	108,038	▲ 10,720	181,050	62,292	118,758
5	大津町	50,123	▲ 63,384	80,020	▲ 33,487	113,507
6	西原村	80,145	▲ 27,647	64,363	▲ 43,429	107,792
7	菊池市	22,792	▲ 77,366	79,663	▲ 20,495	100,158
8	南阿蘇村	104,926	18,883	80,563	▲ 5,480	86,043
9	甲佐町	35,357	▲ 49,817	38,066	▲ 47,108	85,174
10	宇土市	54,452	▲ 26,719	112,241	31,070	81,171
11	嘉島町	40,599	▲ 33,078	41,190	▲ 32,487	73,677
12	阿蘇市	32,690	▲ 34,164	83,333	16,479	66,854
13	合志市	25,670	▲ 17,975	84,155	40,510	43,645
14	菊陽町	17,480	▲ 20,248	59,184	21,456	37,728
15	八代市	12,425	▲ 16,515	46,730	17,790	28,940
16	氷川町	8,635	▲ 12,159	13,439	▲ 7,355	20,794
17	美里町	8,869	▲ 10,400	13,585	▲ 5,684	19,269
18	玉名市	3,510	▲ 2,364	26,382	20,508	5,874
19	山都町	7,652	2,014	20,500	14,862	5,638
20	玉東町	5,054	593	6,829	2,368	4,461
21	産山村	2,480	▲ 1,977	3,342	▲ 1,115	4,457
22	南小国町	1,006	▲ 309	2,566	1,251	1,315
23	芦北町	94	▲ 375	726	257	469
24	小国町	23	▲ 198	1,090	869	221
25	和水町	772	615	1,598	1,441	157
26	南関町	164	48	799	683	116
	合計	1,815,256	▲ 1,293,665	3,284,315	175,394	3,108,921

付録表 2-4 REIC 速報を利用して推計した解体建物棟数

	市町村	REIC 速報		一部損壊 建物棟数 推計値	解体建物棟数 (推計)	解体建物棟 数(実績)	残差
		全壊 棟数	半壊 棟数				
1	熊本市	16,679	39,291	65,485	32,512	13,241	19,271
2	益城町	4,033	3,707	9,056	5,446	5,702	▲ 256
3	宇城市	427	2,648	3,598	1,517	2,433	▲ 916
4	御船町	245	995	1,451	652	1,719	▲ 1,067
5	大津町	642	2,294	3,435	1,578	1,541	37
6	西原村	987	1,135	2,483	1,428	1,772	▲ 344
7	菊池市	1,097	2,956	4,742	2,293	1,309	984
8	南阿蘇村	205	874	1,262	562	1,100	▲ 538
9	甲佐町	95	477	669	291	1,221	▲ 930
10	宇土市	1,062	2,869	4,599	2,224	1,103	1,121
11	嘉島町	322	895	1,424	685	1,138	▲ 453
12	阿蘇市	140	859	1,169	494	900	▲ 406
13	合志市	408	2,202	3,054	1,313	628	685
14	菊陽町	308	1,613	2,248	971	433	538
15	八代市	12	291	355	132	293	▲ 161
16	氷川町	11	148	186	72	315	▲ 243
17	美里町	27	276	355	141	393	▲ 252
18	玉名市	26	359	450	175	174	1
19	山都町	54	306	421	180	121	59
20	玉東町	7	99	124	48	60	▲ 12
21	産山村	1	13	16	7	42	▲ 35
22	南小国町	2	37	46	18	23	▲ 5
23	芦北町	0	3	4	1	4	▲ 3
24	小国町	2	39	48	19	1	18
25	和水町	16	152	197	80	3	77
26	南関町	0	0	0	0	2	▲ 2
	合計	26,808	64,538	106,875	52,839	35,671	17,168

付録表 2-5 REIC 速報を利用して推計した既存と本研究の災害廃棄物発生量

	市町村	既存推計	残差	本研究推計	残差	実績
1	熊本市	2,870,852	1,278,091	2,788,093	1,195,332	1,592,761
2	益城町	558,605	219,432	389,088	49,915	339,173
3	宇城市	111,922	▲ 58,847	116,999	▲ 53,770	170,769
4	御船町	51,948	▲ 66,810	48,558	▲ 70,200	118,758
5	大津町	128,794	15,287	113,045	▲ 462	113,507
6	西原村	142,038	34,246	103,737	▲ 4,055	107,792
7	菊池市	197,519	97,361	173,969	73,811	100,158
8	南阿蘇村	44,437	▲ 41,606	40,826	▲ 45,217	86,043
9	甲佐町	22,277	▲ 62,897	21,140	▲ 64,034	85,174
10	宇土市	191,389	110,218	160,529	79,358	81,171
11	嘉島町	58,617	▲ 15,060	49,762	▲ 23,915	73,677
12	阿蘇市	36,481	▲ 30,373	40,359	▲ 26,495	66,854
13	合志市	99,263	55,618	95,172	51,527	43,645
14	菊陽町	73,780	36,052	72,015	34,287	37,728
15	八代市	8,213	▲ 20,727	9,729	▲ 19,211	28,940
16	氷川町	4,750	▲ 16,044	5,230	▲ 15,564	20,794
17	美里町	9,617	▲ 9,652	10,243	▲ 9,026	19,269
18	玉名市	11,443	5,569	13,229	7,355	5,874
19	山都町	13,478	7,840	13,179	7,541	5,638
20	玉東町	3,136	▲ 1,325	3,487	▲ 974	4,461
21	産山村	421	▲ 4,036	509	▲ 3,948	4,457
22	南小国町	1,100	▲ 215	1,400	85	1,315
23	芦北町	70	▲ 399	73	▲ 396	469
24	小国町	1,147	926	1,380	1,159	221
25	和水町	5,429	5,272	5,812	5,655	157
26	南関町	0	▲ 116	0	▲ 116	116
	合計	4,646,726	1,537,805	4,277,563	1,168,642	3,108,921

謝辞

本研究を進めるにあたって、東京工業大学教授 松岡昌志先生には大変お世話になり誠に感謝申し上げます。入学以前からリモートセンシングや防災に関してご教授頂いたことに始まりこの学位論文を仕上げるまで、研究への取り組みと方向性についてご指導頂き、時として研究の方法や結果について深い議論となったこともあり貴重な時間を割いて頂きましたことに深くお礼申し上げます。

本論文を審査して頂きました、元結正次郎教授、山中浩明教授、盛川仁教授、室町室町泰徳准教授、浅輪貴史准教授には、的確なご指摘とアドバイスを頂戴致しまして、本論文限らず、私の研究への取り組みにおいても至らぬ点を見直し、改善へと導いてくださりましたことに感謝申し上げます。

東京工業大学元教授 翠川三郎先生には、過去の研究の知識をご教授頂きました。また、松岡研究室の押尾晴樹助教、Sadra Karimzadeh 特別研究員、Raveerat Jaturapitpornchai 博士、Min-Lung Cheng 博士、大串文誉博士、Patcharavadee Thamarux 氏、篠原崇之氏、Haoyi Xiu 氏、市川真弓氏、同じ時期に学んだ修士の学生の皆様には、ゼミや発表練習では多くのアドバイスと時には研究を続ける気持ちの支えを頂き、萬田久美子氏には事務手続きでお世話になり、誠にありがとうございます。

本研究で調査を行った益城町の職員並びに関係の方々、富山大学の井ノ口宗成准教授、堀江啓博士には、被害及び建物情報の調査にご協力頂きました。九州大学の島岡隆行教授、眞鍋和俊氏、廃棄物資源循環学会員の皆様から、災害廃棄物に関してこれまでの調査研究に基づく様々な経験、知識とアドバイスを頂きました。また、RESTEC に関係する方々からも励ましの言葉を頂戴しました。皆様からのご支援がなければ本研究は完成しなかっただろうと思うと、ありがたく感じております。

最後に、妻、長女、長男、両親が長い期間研究を支えてくれたことはとてもありがたく、そして、子供達が大きくなって、もしこの論文に目を通して感謝の気持ちが伝わればより嬉しく思います。

2022年2月
串山 傳

