

4. 2016年熊本地震を踏まえた建物被害および、人的被害推定手法の開発

4.1 建物被害関数の試作

4.1.1 熊本地震におけるリアルタイム被害推定

藤原ほか(2016)によると熊本地震発生時点において試験運用を行っていたリアルタイム地震被害推定システム(以下、システムと記す)は、表4.1.1-1に示す5種類の手法(M1~M5)により、建物被害推定を行っていた。以下に、システムでの推定状況について述べる。なお、システムの詳細については6章で述べる。また、以下では2016年4月14日に発生したM6.5の地震を「前震」、4月16日に発生したM7.3の地震を「本震」と記す。

(1) 前震

前震においては地震発生から約29秒後にシステムは第1報を発信し、約10分間で第7報を発信した(図4.1.1-1)。最終的に1,091観測点の強震データから推定した震度分布を図4.1.1-2に示す。震度7が観測された益城町宮園観測点を中心として震源の北側に、布田川断層帯や日奈久断層帯に平行するように震度7に相当する揺れの領域が広がっている。この震度分布と平成22年国勢調査に関する地域メッシュ統計による夜間人口を用いて求めた震度曝露人口は、震度6弱以上が合計で約62万人、震度6強以上が約29万人であった(表4.1.1-2)。

また、表4.1.1-1に示す手法毎の推定建物全壊棟数分布を図4.1.1-3に示す。手法毎に棟数の多寡はあるものの、定性的な分布形状は同様であり、江津湖の東側から益城町宮園地区にかけて長さ7km、幅1km程度の細長い領域に全壊建物棟数が多く分布している。この地域は図4.1.1-4に示すように、県道28号線沿いに建物が多く存在する地域であり、そこに震度7相当の地震動が入力され全壊棟数が多く推定されたものと考えられる。表4.1.1-3に地域毎の推定全壊建物棟数の集計値を示す。熊本市東区や益城町で多くの被害棟数が推定されており、手法毎に全壊棟数を合計すると概ね6,000棟~14,000棟となる。

表 4.1.1-1 建物被害推定手法の一覧

手法名	建物構造	参考文献
M1	木造	中央防災会議(2012)
	RC造	
	S造	
M2	木造	堀江(2004) D4,D2 村尾・山崎(2002)
	RC造	
	S造	
M3	木造	堀江(2004) D3,D1 村尾・山崎(2000)
	RC造	
	S造	
M4	木造	村尾・山崎(2002)
	RC造	
	S造	
M5	木造	中央防災会議(2004)
	RC造	
	S造	

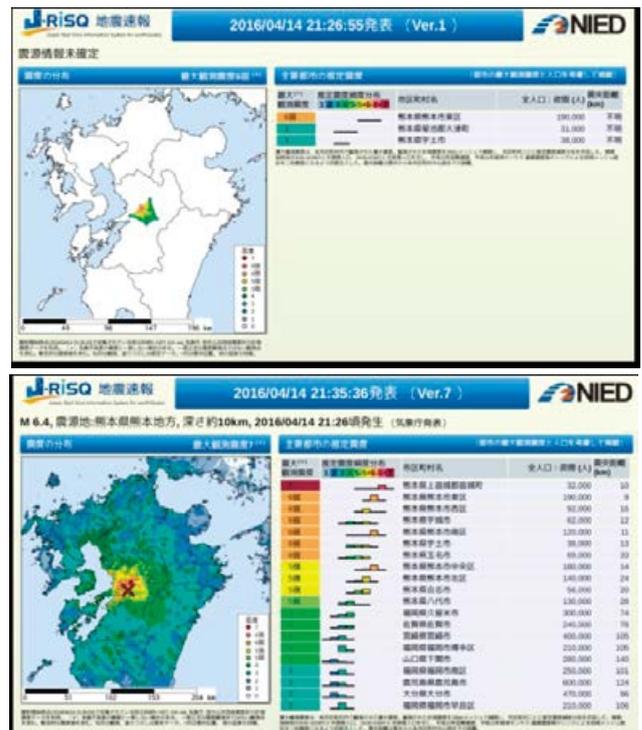


図 4.1.1-1 前震における推定結果 (上段:第1報, 下段:第7報)

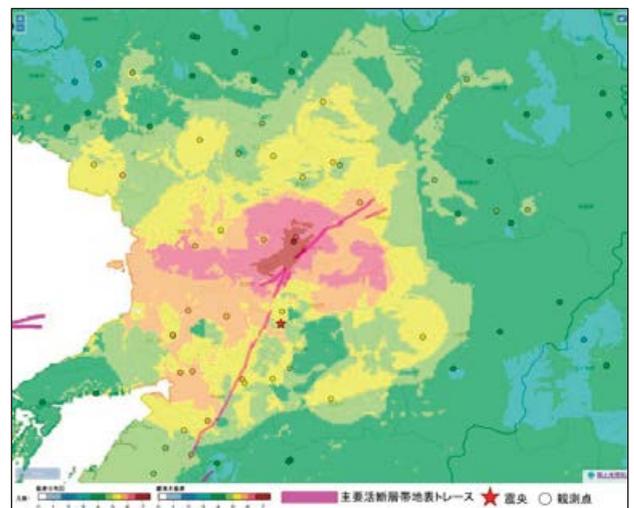


図 4.1.1-2 前震における推定震度分布

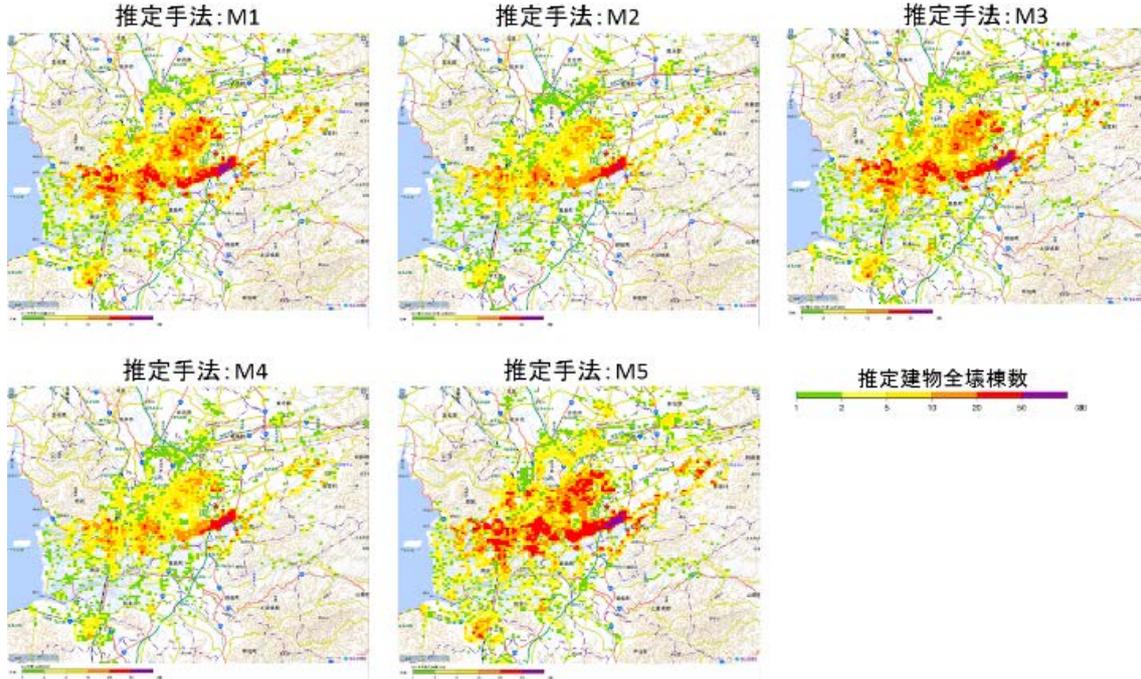


図 4.1.1-3 前震における手法毎の推定建物全壊棟数分布

表 4.1.1-2 前震における地域毎の震度曝露人口

地域名	震度曝露人口(夜間人口)			
	震度5弱以上	震度5強以上	震度6弱以上	震度6強以上
長崎県島原市	245	0	0	0
長崎県雲仙市	231	0	0	0
熊本県熊本市中央区	184,837	184,837	148,733	25,612
熊本県熊本市東区	187,989	187,666	183,625	147,303
熊本県熊本市西区	92,033	88,026	71,130	31,253
熊本県熊本市南区	123,931	123,340	118,327	51,394
熊本県熊本市北区	141,066	120,117	10,894	657
熊本県八代市	115,040	795	0	0
熊本県荒尾市	230	0	0	0
熊本県玉名市	30,304	10,745	0	0
熊本県山鹿市	470	0	0	0
熊本県菊池市	24,921	3,798	0	0
熊本県宇土市	36,302	31,800	10,891	0
熊本県上天草市	8,843	0	0	0
熊本県宇城市	53,492	48,279	21,957	0
熊本県阿蘇市	5,524	0	0	0
熊本県天草市	1,202	0	0	0
熊本県合志市	53,487	19,545	0	0
熊本県下益城郡美里町	10,728	8,196	0	0
熊本県玉名郡玉東町	3,974	448	0	0
熊本県玉名郡南関町	3	0	0	0
熊本県玉名郡長洲町	2,448	0	0	0
熊本県玉名郡和水町	3,999	388	0	0
熊本県菊池郡大津町	31,004	22,858	94	0
熊本県菊池郡菊陽町	38,316	24,103	438	146
熊本県阿蘇郡高森町	1,143	0	0	0
熊本県阿蘇郡西原村	6,562	6,555	5,441	118
熊本県阿蘇郡南阿蘇村	6,076	119	0	0
熊本県上益城郡御船町	16,586	15,176	7,001	1,014
熊本県上益城郡嘉島町	10,257	10,257	10,257	4,839
熊本県上益城郡益城町	31,795	31,795	31,672	31,143
熊本県上益城郡甲佐町	10,617	6,002	2,207	0
熊本県上益城郡山都町	9,794	7,411	537	81
熊本県八代郡氷川町	11,769	4,055	0	0
宮崎県延岡市	4,162	0	0	0
宮崎県東臼杵郡椎葉村	358	0	0	0
宮崎県西臼杵郡高千穂町	178	0	0	0
宮崎県西臼杵郡五ヶ瀬町	32	0	0	0
鹿児島県出水郡長島町	3	0	0	0
合計	1,259,951	956,311	623,204	293,560

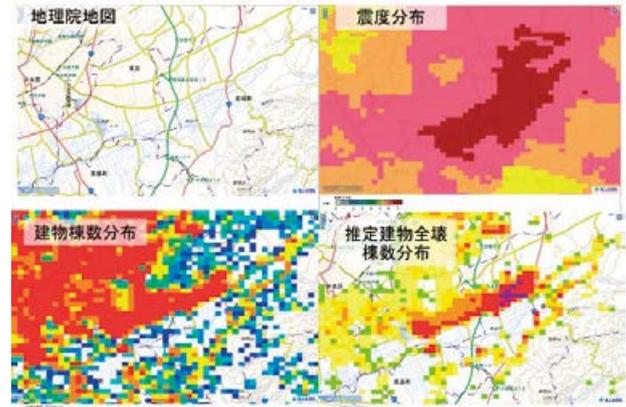


図 4.1.1-4 前震における益城町周辺の震度分布，建物棟数分布，および推定建物全壊棟数分布

表 4.1.1-3 前震における地域毎の推定全壊棟数

地域名	全壊棟数推定手法				
	M1	M2	M3	M4	M5
熊本県熊本市中央区	605	332	623	311	881
熊本県熊本市東区	3,382	1,876	3,425	1,811	4,794
熊本県熊本市西区	1,200	674	1,224	643	1,693
熊本県熊本市南区	1,196	658	1,233	623	1,739
熊本県熊本市北区	20	10	19	9	30
熊本県八代市	0	0	0	0	0
熊本県玉名市	1	0	0	0	1
熊本県菊池市	0	0	0	0	0
熊本県宇土市	13	10	15	7	20
熊本県宇城市	29	23	37	18	44
熊本県合志市	0	0	0	0	1
熊本県下益城郡美里町	0	0	0	0	0
熊本県玉名郡玉東町	0	0	0	0	0
熊本県菊池郡大津町	1	0	0	0	1
熊本県菊池郡菊陽町	6	4	8	4	9
熊本県阿蘇郡西原村	17	14	23	11	26
熊本県上益城郡御船町	76	44	83	41	116
熊本県上益城郡嘉島町	211	124	219	119	301
熊本県上益城郡益城町	3,237	2,231	3,402	2,276	4,244
熊本県上益城郡甲佐町	5	4	7	3	8
熊本県上益城郡山都町	11	7	13	6	17
熊本県八代郡氷川町	0	0	0	0	0
合計	10,010	6,011	10,331	5,882	13,925

(2) 本震

前震から約28時間後に発生した本震では、地震発生から約29秒後にシステムは第1報を発信し、約11分間で8報を発信した。最終的に2,389観測点の強震データから推定した震度分布を図4.1.1-5に示す。なお、この時点で地震後に現地収集された益城町宮園と西原村小森の震度計データ(いずれも震度7)は含まれていない。図4.1.1-6に前述の震度7の2観測点のデータを加えた推定震度分布を示す。前震と同様に、布田川断層帯や日奈久断層帯に平行するように震度7に相当する揺れの領域が広がっていることに加え、菊池市の南部にも震度7に相当する揺れが推定されている。また、推定した震度6弱以上の揺れの面積で見ると、前震は約400km²に対して本震では約1,600km²であり、約4倍広い。これ以降、特に断りのない限り図4.1.1-6の震度分布を入力とした被害推定結果について述べる。夜間人口を用いて求めた震度曝露人口は震度6弱以上が合計で約113万人、震度6強以上が約67万人であり、前震の2倍程度ある。

また、表4.1.1-1に示す手法毎の推定建物全壊棟数分布を図4.1.1-7に示す。この結果は前震を含む本震より前に発生した地震の建物への影響は考慮していないことに注意が必要である。被害の分布としては、前震と同様の江津湖の東側から益城町宮園地区にかけての帯状の領域に加え、熊本市の東区や中央区等の広い領域で全壊棟数を多く推定した。表4.1.1-4に熊本県(2018)と消防庁(2018a)における地域毎の推定全壊建物棟数の集計値と実被害の比較を示す。実被害が多い地域は推定値も大きくなる傾向はあるものの、全体的に推定値は過大評価傾向にあり、実被害の全壊棟数が8,653棟に対し、推定は15,931棟～37,568棟であった(被害量としては前震の約2.6倍)。なお、図4.1.1-5で示す地震動を入力とした場合の推定全壊棟数は、12,361棟～31,398棟であった。

以上のようなリアルタイム被害推定結果を踏まえ、熊本地震における建物被害の全容を把握するための調査を実施し、その調査結果に基づいた被害関数の改良を試みた。

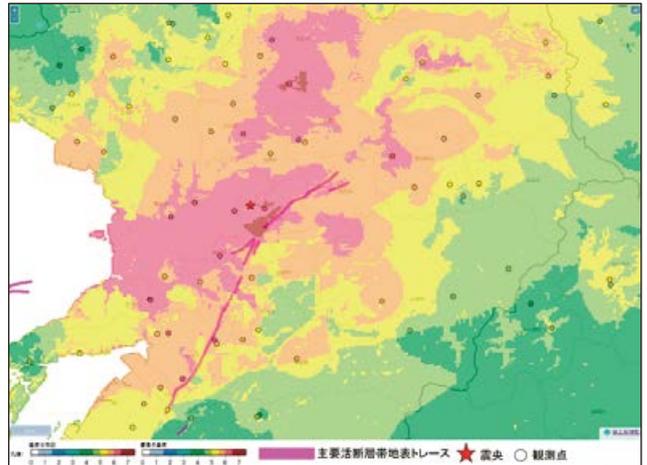


図4.1.1-5 本震における推定震度分布
(益城町宮園と西原村小森のデータを含まない)

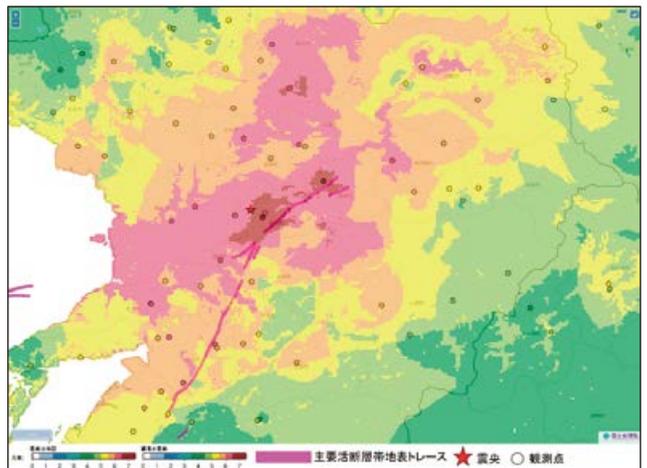


図4.1.1-6 本震における推定震度分布
(益城町宮園と西原村小森のデータを含む)

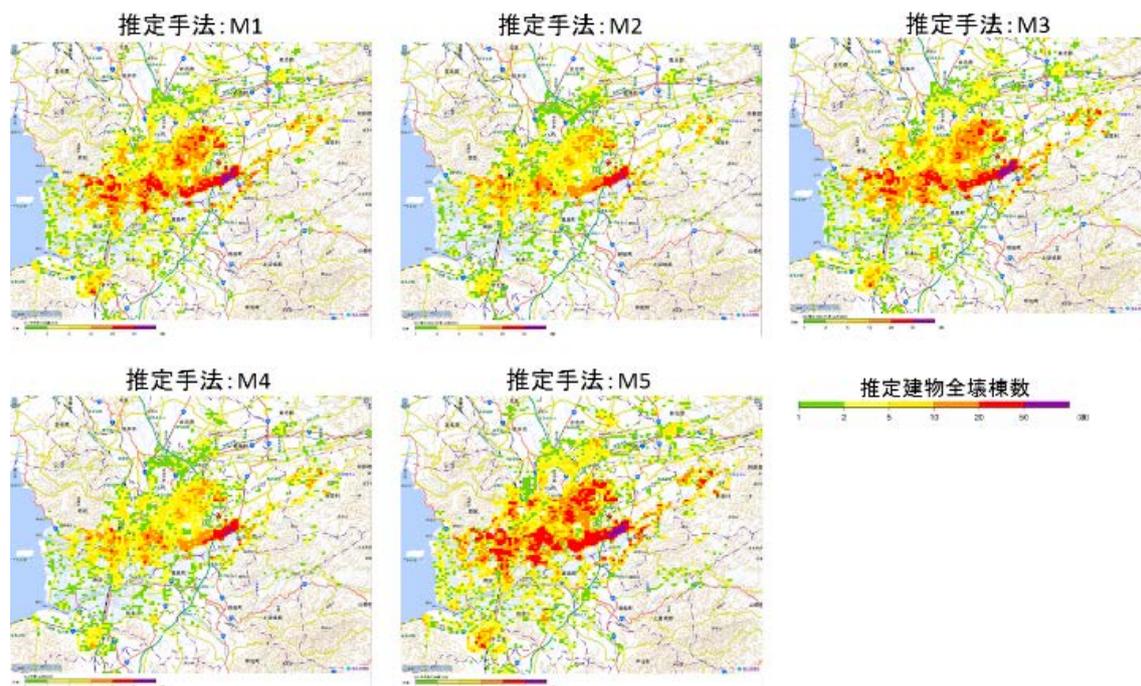


図 4.1.1-7 本震における手法毎の推定建物全壊棟数分布

表 4.1.1-4 本震における実被害と被害推定結果の比較

県市町村名	実被害	推定手法				
		M1	M2	M3	M4	M5
熊本市	2,456	16,679	9,577	16,936	9,216	23,235
八代市	20	12	3	4	2	17
人吉市	0	0	0	0	0	0
荒尾市	0	0	0	0	0	0
水俣市	0	0	0	0	0	0
玉名市	11	26	19	34	16	40
山鹿市	0	2	0	1	0	3
菊池市	58	1,097	703	1,183	687	1,539
宇土市	116	1,062	595	1,080	573	1,503
上天草市	0	4	3	5	2	6
宇城市	539	427	239	449	223	639
阿蘇市	108	140	83	153	76	209
天草市	0	1	0	0	0	1
合志市	47	408	233	431	215	606
美里町	19	27	20	34	17	40
玉東町	14	7	5	9	4	10
南関町	1	0	0	0	0	0
長州町	0	0	0	0	0	0
和水町	0	16	12	19	10	23
大津町	154	642	348	648	335	940
菊陽町	15	308	175	333	166	455
南小国町	1	2	1	2	1	3
小国町	0	2	2	2	1	3
産山村	12	1	1	1	0	1
高森町	0	1	1	1	0	2
西原村	512	987	669	1,082	667	1,304
南阿蘇村	700	205	116	217	109	302
御船町	444	245	146	258	144	361
嘉島町	234	322	180	329	174	458
益城町	3,026	4,033	2,900	4,295	3,029	5,198
甲佐町	105	95	51	95	48	142
山都町	16	54	37	64	34	79
氷川町	35	11	8	14	6	17
芦北町	0	0	0	0	0	0
津奈木町	0	0	0	0	0	0
錦町	0	0	0	0	0	0
多良木町	0	0	0	0	0	0
湯前町	0	0	0	0	0	0
水上町	0	0	0	0	0	0
相良村	0	0	0	0	0	0
五木村	0	0	0	0	0	0
山江村	0	0	0	0	0	0
球磨村	0	0	0	0	0	0
あさぎり町	0	0	0	0	0	0
苓北町	0	0	0	0	0	0
大分県	10	307	186	334	176	432
合計	8,653	27,123	16,313	28,013	15,931	37,568

4.1.2 航空写真判読による熊本地震の建物被害調査

熊本地震の建物被害調査は航空写真判読調査により実施した。調査は、表 4.1.2-1 に示す本震後に撮影された航空写真を用いて、建物被害および建物構造を判読し、また、熊本地震以前に撮影された航空写真の比較から、建物建築年代を判読し、建物構造および建築年代による被害特性を調査した。以下に、調査の詳細について述べる。

表 4.1.2-1 航空写真の諸元

撮影機関	(株)パスコ	国土地理院
画像名	垂直オルソ画像	垂直オルソ画像
撮影年月日	2016年4月19日	2016年4月16～20日
画像解像度	20 cm	20 cm

(1) 建物被害判読

建物被害は、本震後に撮影された航空写真の目視判読により建物1棟単位の被害程度を、表 4.1.2-2 に示す基準により被害大、被害中、被害小および無被害の4つに区分した。被害大は建物が傾斜している、層破壊がみられる、あるいは完全に倒壊しているもの、被害中は建物の外形の変化はないが壁面が落下、または屋根瓦の大半が落下しているもの、被害小は屋根瓦の一部の落下が確認できたもの、無被害は航空写真では被害が確認できないものとした。

判読結果は、**図 4.1.2-1** に示すように航空写真上の建物の中心にポイントを付け、GIS化した。

判読の対象自治体は、熊本市、阿蘇市、宇城市、宇土市、益城町、嘉島町、御船町、甲佐町、大津町、西原村および南阿蘇村の11市町村で、判読棟数は約42万棟である。

各市町村の被害判読結果を**表 4.1.2-3** に示す。**表 4.1.2-3** から、被害大が最も多いのが震度7を観測した益城町の1,466棟で、次いで熊本市の278棟である。被害中が最も多いのが熊本市の5,359棟で、次いで、益城町の1,655棟である。

この建物被害判読の結果と県公表全壊棟数の関係を検討した。まず、被害大の棟数と県公表全壊棟数の比較を**表 4.1.2-4**、**図 4.1.2-2** に示す。この比較から、益城町と嘉島町の被害大の棟数は県公表全壊棟数の概ね約60%程度で、それ以外の市町村は約30%以下と少ない。このことから、県公表の全壊建物には、被害大の建物以外に被害中の建物が含まれることがわかる。そこで、被害中と被害大の合計棟数、並びに被害中の1/2と被害大の合計棟数の2ケースについて、県公表全壊棟数と比較した。

被害中と被害大の合計棟数と県公表全壊棟数の比較を**表 4.1.2-5**、**図 4.1.2-3** に示す。この比較から、被害中と被害大の合計棟数は、全体的には県公表全壊棟数よりも多い傾向にあるが、阿蘇市、宇城市、益城町、御船町、西原村および南阿蘇村は約80～120%の範囲と近似的であり、震度7を記録した益城町は、被害中と被害大の合計棟数は県公表全壊棟数の約120%である。一方、熊本市、宇土市、嘉島町、甲佐町および大津町は、被害中と被害大の合計棟数が、県公表全壊棟数に比べて約200～300%と極めて多く、特に熊本市は、被害中の棟数が多い。この理由は、熊本市の判読に使用した航空写真は、4月16日日本震発生の3日後の4月19日に撮影されたもので、この3日間で、**図 4.1.2-4** に示すように、屋根全体にブルーシートがかけられた建物が多くあり、これら建物を被害中と判定したことによる。

被害中の1/2と被害大の合計棟数と県公表全壊棟数の比較を**表 4.1.2-6**、**図 4.1.2-5** に示す。この比較から、被害中の1/2と被害大の合計棟数は、全体的に県公表全壊棟数よりも少ない傾向となり、阿蘇市、宇城市、益城町、御船町、西原村および南阿蘇村は

50～90%であるのに対し、熊本市、宇土市、嘉島町、甲佐町および大津町は約120～160%となる。

以上のことから、阿蘇市、宇城市、益城町、御船町、西原村および南阿蘇村は、被害中と被害大の合計を全壊棟数とすると、実被害数に対して約±20%の判読精度となり、熊本市、宇土市、嘉島町、甲佐町および大津町は、被害中の1/2と被害大の合計を全壊棟数とすると、実被害数に対して約+20～60%の判読精度となる。

ここで、被害中と被害大の合計を全壊棟数としたケースの全壊棟数分布図を**図 4.1.2-6** に、被害中の1/2と被害大の合計を全壊棟数としたケースの全壊棟数分布図を**図 4.1.2-7** に、5種類の手法のうち、M1の推定全壊棟数分布図を**図 4.1.2-8** に示す。ただし、図の範囲は、熊本市の東区と中央区、益城町、嘉島町、西原村および南阿蘇村の5市町村である。

これらの図から、M1の推定結果と判読結果を比較すると、益城町、西原村および南阿蘇村の推定結果の空間分布は、被害中と被害大の合計の全壊棟数分布に調和的であるが、熊本市の東区と中央区は、これに対して不調和であり、推定棟数は明らかに過大な分布である。これは、熊本市の東区と中央区の推定震度は6強であることから、採用している被害関数の6強の震度階における被害率が、実被害よりも大きいことを示している。

なお、熊本地震では、震度7の前震および本震が連続して発生したことから、本震の建物被害は、前震の揺れの影響を受けている可能性が指摘されている。

そこで、益城町を対象に、前震後の4月15日に撮影された航空写真から本震と同様な区分で建物被害を判読し、建物被害の変移を解析して、**表 4.1.2-7** に示す。**表 4.1.2-7** から、前震から本震の被害レベルの変移をみると、被害大は前震が227棟、本震後は1,466棟となり、1,239棟増加している。被害中でも、1,337棟増加している。前震から本震の被害レベルの遷移をみると、前震の無被害のうち16%が本震で被害レベルが上がったのに対し、被害小と被害中は、半数近くの建物の被害レベルが上がっている。このことから、前震で建物の強度が低下した建物程、本震で被害が大きくなったことがわかる。

表 4.1.2-2 被害判読の区分基準

被害区分	被害程度
無被害	航空写真では被害が確認できないもの
被害小	屋根瓦の一部の落下が確認できたもの
被害中	建物の外形の変化はないが壁面が落下、または屋根瓦の大半が落下しているもの
被害大	建物が傾斜している、層破壊がみられる、あるいは完全に倒壊しているもの



図 4.1.2-1 判読結果の GIS 化

表 4.1.2-3 市町村の被害判読結果

	無被害	被害小	被害中	被害大	計
熊本市	202,042	47,515	5,359	278	255,194
阿蘇市	21,546	3,355	98	34	25,033
宇城市	28,213	11,980	430	84	40,707
宇土市	15,038	6,629	352	2	22,021
益城町	11,319	2,641	1,655	1,466	17,081
嘉島町	3,916	992	399	179	5,486
御船町	8,591	3,717	697	37	13,042
甲佐町	5,691	3,151	285	18	9,145
大津町	13,282	3,383	335	23	17,023
西原村	4,072	1,011	464	183	5,730
南阿蘇村	9,966	1,405	258	159	11,788
総計	323,676	85,779	10,332	2,463	422,250

表 4.1.2-4 被害大棟数と県公表全壊棟数の比較

市町村名	被害大棟数:A	県公表全壊棟数:B	差 B-A
熊本市	278	2,383	2,105
阿蘇市	34	114	80
宇城市	84	435	351
宇土市	2	106	104
益城町	1,466	2,557	1,091
嘉島町	179	272	93
御船町	37	736	699
甲佐町	18	114	96
大津町	23	117	94
西原村	183	505	322
南阿蘇村	159	564	405

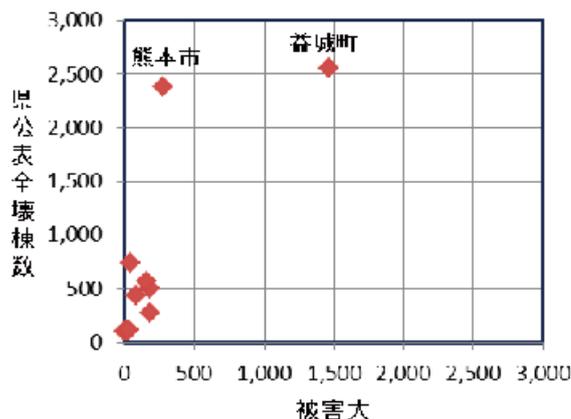


図 4.1.2-2 被害大棟数と県公表全壊棟数の関係

表 4.1.2-5 被害中と被害大の合計棟数と県公表全壊棟数の比較

市町村名	被害中と大合計棟数:A	県公表全壊棟数:B	比率 A/B
熊本市	5,637	2,383	237%
阿蘇市	132	114	116%
宇城市	514	435	118%
宇土市	354	106	334%
益城町	3,121	2,557	122%
嘉島町	578	272	213%
御船町	734	736	100%
甲佐町	303	114	266%
大津町	358	117	306%
西原村	647	505	128%
南阿蘇村	417	564	74%
合計	12,795	7,903	162%

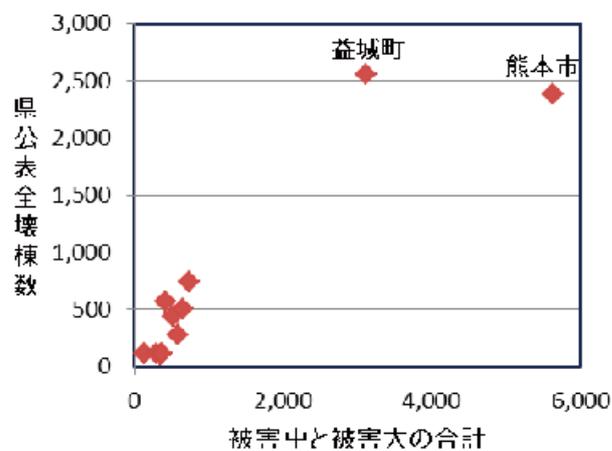


図 4.1.2-3 被害中と被害大の合計棟数と県公表全壊棟数の関係



図 4.1.2-4 ブルーシート被覆建物(熊本市東区)

表 4.1.2-6 被害中の1/2と被害大の合計棟数と県公表全壊棟数の比較

市町村名	被害中の1/2と被害大の合計棟数:A	県公表全壊棟数:B	比率 A/B
熊本市	2,958	2,383	124%
阿蘇市	83	114	73%
宇城市	299	435	69%
宇土市	178	106	168%
益城町	2,294	2,557	90%
嘉島町	379	272	139%
御船町	386	736	52%
甲佐町	161	114	141%
大津町	191	117	163%
西原村	415	505	82%
南阿蘇村	288	564	51%
合計	7,629	7,903	97%

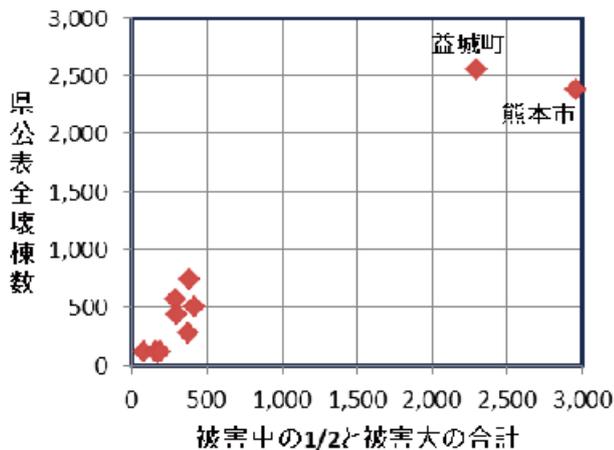


図 4.1.2-5 被害中の1/2と被害大の合計と県公表全壊棟数の関係

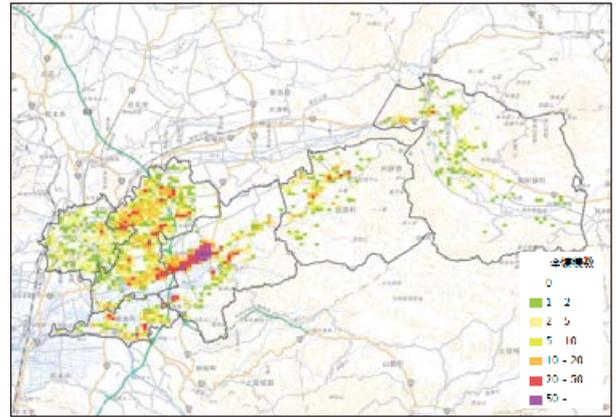


図 4.1.2-6 被害中と被害大の合計棟数の分布

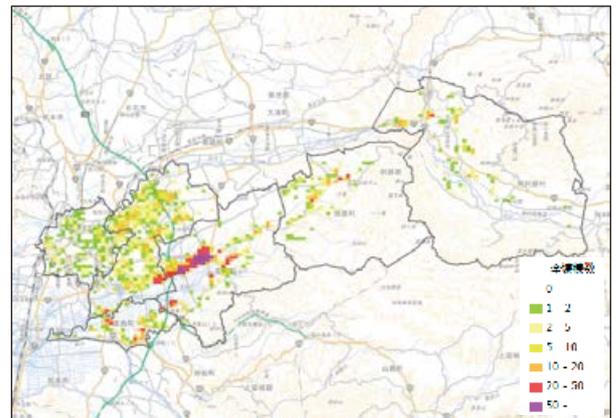


図 4.1.2-7 被害中の1/2と被害大の合計棟数の分布

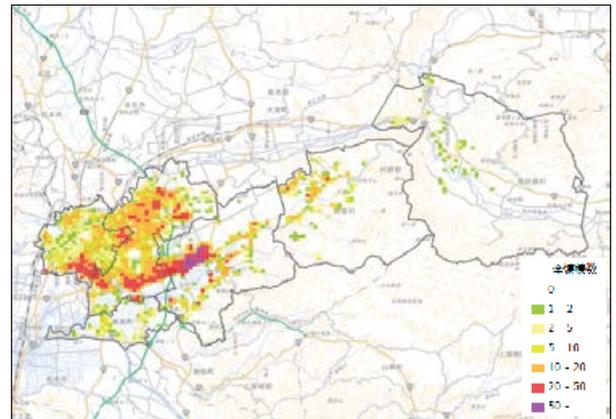


図 4.1.2-8 M1手法の全壊棟数の分布

表 4.1.2-7 前震から本震への被害レベルの変移

前震被害棟数	本震被害棟数				計
	無被害	被害小	被害中	被害大	
無被害	11,319	1,307	457	343	13,426
被害小		1,334	920	633	2,887
被害中			278	263	541
被害大				227	227
計	11,319	2,641	1,655	1,466	17,081

(2) 建物構造判読

建物構造は、表 4.1.2-8 に示す基準に従い、本震後に撮影された航空写真の目視判読により建物 1 棟単位に、木造および非木造に区分した。

木造は、屋根形状が切妻、寄棟、入母屋、越屋根など木造住宅の特徴を表すものとし、非木造は屋根がフラットな建物や面積が大きい建物、あるいは基盤地図情報ポリゴンに「種別＝堅ろう建物、堅ろう無壁」と記載されている建物とした。

判読対象の自治体は、熊本市の東区と中央区、益城町、嘉島町、西原村および南阿蘇村の 5 市町村である。

建物構造の判読結果は、図 4.1.2-1 に示す建物ポイントにデータを付加し、GIS 化した。

各市町村の判読結果の木造および非木造の棟数および比率を表 4.1.2-9 に、その空間分布を図 4.1.2-9 示す。表 4.1.2-9 から、木造の比率は、熊本市中央区は小さく、南阿蘇村が大きいことを除くと、残り市町村は 75～77% である。

次に、木造および非木造別の建物被害区分別棟数を表 4.1.2-10 と表 4.1.2-11 に示す。この表から、木造の被害大は 2,144 棟であるのに対し、非木造の被害大は 18 棟と極めて少なく、熊本地震の建物被害は木造建物に集中している。市町村別の木造の被害大をみると、益城町が 1,462 棟と群を抜いて多く、熊本市中央区を除く他の市町村は約 140～180 棟である。木造の被害中は、熊本市東区が最も多く、次いで益城町である。非木造の被害大は、熊本市東区、西原村および南阿蘇村が 5～6 棟であり、被害中は、熊本市東区と益城町が約 50 棟と、他の市町村に比べて多い。

また、建物構造の判読精度を検討するため、表 4.1.2-9 には、平成 29 年度固定資産概要調書(総務省)から算出した木造および非木造の棟数および比率を併せて示す。なお、固定資産概要調書の建物には、官公署や宗教法人等の非課税建物は含まれていないことから、実際の建物棟数はこれより多い。また、これら非課税建物の多くは非木造であることから、木造の比率は、これよりもおそらく 1～2% 程度小さくなると考えられる。

表 4.1.2-9 から、固定資産概要調書の木造比率と判読結果の木造比率の差を概観すると、5～8% 程度であることから、木造および非木造の判読精度は、誤差 5% 程度と考えられる。

表 4.1.2-8 建物構造の判読基準

構造	特徴
木造	屋根形状が切妻、寄棟、入母屋、越屋根など木造住宅の特徴を表す建物
非木造	屋根がフラットな建物や面積が大きい建物、あるいは基盤地図情報ポリゴンに「種別＝堅ろう建物、堅ろう無壁」と記載されている建物

表 4.1.2-9 建物構造判読結果

市町村	構造	判読		固定資産概要調書	
		棟数	比率(%)	棟数	比率(%)
熊本市中央区	木造	29,874	67	熊本市 全域比率	75 25
	非木造	14,712	33		
	合計	44,586	100		
熊本市東区	木造	43,210	77	熊本市 全域比率	75 25
	非木造	13,076	23		
	合計	56,286	100		
嘉島町	木造	4,126	75	4,061	80
	非木造	1,357	25	1,026	20
	合計	5,483	100	5,087	100
益城町	木造	13,147	79	14,118	85
	非木造	3,579	21	2,529	15
	合計	16,726	100	16,647	100
西原村	木造	4,314	76	4,029	83
	非木造	1,398	24	846	17
	合計	5,712	100	4,875	100
南阿蘇村	木造	9,718	83	9,716	84
	非木造	2,051	17	1,831	16
	合計	11,769	100	11,547	100

表 4.1.2-10 木造の被害区分別棟数

市町村	無被害	被害小	被害中	被害大	計
熊本市中央区	24,906	4,292	646	30	29,874
熊本市東区	30,887	9,217	2,962	144	43,210
嘉島町	2,620	939	389	178	4,126
益城町	7,577	2,508	1,600	1,462	13,147
西原村	2,780	911	446	177	4,314
南阿蘇村	8,008	1,309	248	153	9,718
計	76,778	19,176	6,291	2,144	104,389

表 4.1.2-11 非木造の被害区分別棟数

市町村	無被害	被害小	被害中	被害大	計
熊本市中央区	14,429	261	22	0	14,712
熊本市東区	12,651	367	52	6	13,076
嘉島町	1,294	53	10	0	1,357
益城町	3,407	126	45	1	3,579
西原村	1,275	99	18	6	1,398
南阿蘇村	1,943	94	9	5	2,051
計	34,999	1,000	156	18	36,173

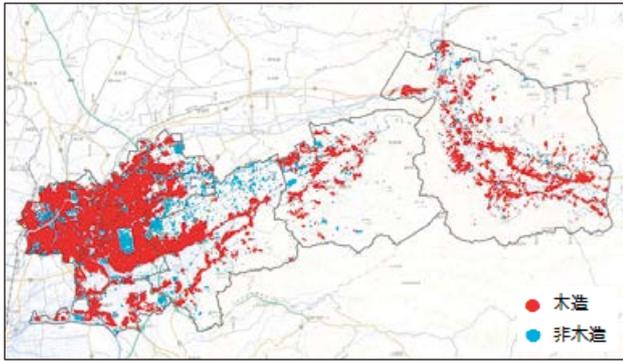


図 4.1.2-9 木造および非木造の判読結果図

(3) 建築年代

建築年代の区分は、1981年の建築基準法改正に境に、1980年以前を旧耐震、1981年以降を新耐震と区分した検討がこれまで多くなされが、2000年の建築基準法改正により、特に木造建物の耐震基準が強化されたことから、旧耐震と、新耐震は新耐震①(1981～1999年)と新耐震②(2000年以降)として、3区分とした。

建築年代は、建築年代区分の境となる1981年に撮影された航空写真、2000年に撮影された航空写真並びに本震後の航空写真から、各写真上の建物位置・形状・屋根色を建物1棟ごとに比較判読し、建築年代を区分する方法を採用した。そこで、1981年および2000年に撮影された航空写真の有無を調査した結果、撮影年が1981年および2000年に一致する航空写真はなく、表 4.1.2-12 に示す撮影年が近い国土地理院の A：国土画像情報(第一期：1974～1978年撮影)および B：簡易空中写真(2004年撮影)を収集した。

表 4.1.2-12 建築年代判読の航空写真

航空写真名	撮影年	撮影機関
A：国土画像情報(第一期)	1974～1978年	国土地理院
B：簡易空中写真	2004年	国土地理院
C：本震後垂直オルソ画像	2016年4月19日	(株)パスコ

収集した国土地理院の A：国土画像情報(第一期：1974～1978年撮影)および B：簡易空中写真(2004年撮影)並びに C：本震後の垂直オルソ画像から、各写真上の建物位置・形状・屋根色を建物1棟ごとに比較判読し、建築年代を区分した。具体的には、図 4.1.2-10 に示すように、A、B および C の全ての写真に同一の建物が存在する場合(図中の■)

は「1978年以前」の建物(①)、B および C の写真に同一の建物が存在する場合(図中の■)は「1979年～2003年」の建物(②)、C の写真だけに存在する場合(図中の■)は「2004年以降」の建物(③)とした。

なお、これら航空写真の撮影年と建築基準法の改正年は一致しないが、①区分を旧耐震、②区分を新耐震①(1981～1999年)、③区分を新耐震②(2000年以降)とみなした。建築年代の判読結果は、図 4.1.2-1 に示す建物ポイントにデータを付加し、GIS化した。

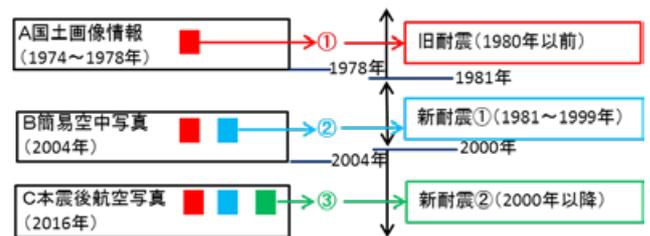


図 4.1.2-10 建築年代の判読基準

建築年代の判読結果を木造および非木造に分けて表 4.1.2-13 に示す。判読範囲は熊本市の中央区と東区、嘉島町、益城町、西原村および南阿蘇村の5市町村である。

表 4.1.2-13 から、各市町村の木造の建築年代比率をみると、熊本市の中央区と東区、それ以外の嘉島町、益城町、西原村および南阿蘇村では、傾向が異なる。熊本市の中央区と東区は、旧耐震が8～9%、新耐震①は78～80%、新耐震②は11～15%であるのに対し、嘉島町、益城町、西原村および南阿蘇村は、旧耐震が21～26%、新耐震①は63～73%、新耐震②は南阿蘇村を除くと9～12%であり、熊本市の中央区と東区に比べて、旧耐震が約15%多く、新耐震①は逆に15%少ない。

同様に、各市町村の非木造の建築年代比率をみると、熊本市の中央区と東区、嘉島町、益城町および西原村は、似たような傾向を示し、旧耐震が4～5%、新耐震①は65～75%、新耐震②は19～31%である。なお、南阿蘇村は、他に比べて新耐震①が約10%多く、新耐震②が約10%少ない。

木造の建築年代別の被害区分別の棟数を表 4.1.2-14 に、被害区分別の被害率を表 4.1.2-15 に示す。表 4.1.2-14 から、建築年代別の被害大の棟数をみると、各市町村とも新耐震①が最も多く、次いで旧耐震と

なっている。しかし、表 4.1.2-15 の被害率で見ると、一般に言われているように旧耐震の被害率は新耐震①よりも大きく、また、新耐震②の被害率は新耐震①に比べると大幅に小さく、2000 年の耐震基準の強化を反映した結果となっている。

同様に、非木造の建築年代別の被害区分別の棟数を表 4.1.2-16 に、被害区分別の被害率を表 4.1.2-17 に示しており、建築年代別の被害大の棟数と被害率をみると、棟数自体が少ないこともあり、木造のような傾向はみられない。

次に、建築年代の判読精度を検討するため、木造の年代別比率と、平成 25 年住宅・土地統計調査（以下、住宅統計）から算出した木造住宅数の比率を表 4.1.2-18 に示す。なお、建物棟数は住宅数の約 1.4 倍となっており、両者には大きな差がある。表 4.1.2-18 から、熊本市中央区を比較すると、旧耐震の比率は、判読は 9% であるのに対し住宅統計は 43%、新耐震①の比率は、判読は 80% であるのに対し住宅統計は 36% と、大きな乖離がある。熊本市東区も同様な乖離がある。

このような大きな乖離が生じた理由は以下のとおりである。

熊本市の建築年代の判読に使用した航空写真は、A：国土画像情報（第一期：1974～1978 年撮影）のうち、1974 年撮影の航空写真であるため、1981 年より 7 年古い方にずれている。また、中央区と東区の年代別木造住宅数を図 4.1.2-11 と図 4.1.2-12 に示しており、両区とも 1971～1980 年に建築された住宅が多く、この年代の住宅の大半が旧耐震ではなく、新耐震①に判読されたためと考えられる。なお、新耐震②はそれほどの大きな乖離はない。これは、判読に使用した航空写真は 2004 年であることから、図 4.1.2-11 と図 4.1.2-12 の 2001～2005 年の住宅数は、新耐震②ではなく新耐震①と判読されるが、住宅数が少ないため、大きな乖離にならなかったと考えられる。

一方、益城町は、熊本市中央区および東区と異なる傾向となった。益城町の比較をみると、旧耐震の比率は判読および住宅統計とも約 20% と近似している。

これは、益城町の建築年代の判読に使用した航空写真は、A：国土画像情報（第一期：1974～1978 年撮影）のうち、1978 年撮影の航空写真であるため、

1981 年と 3 年のずれであり、また、図 4.1.2-13 に示す年代別木造住宅数から、1971～1980 年の住宅数が少ないことが理由である。ただし、新耐震①と新耐震②の比率は、判読と住宅統計では、大きな乖離がある。これは、2001～2005 年の住宅数が新耐震①に判読されたためと考えられる。

表 4.1.2-13 建築年代判読結果

市町村	年代	木造		非木造	
		棟数	比率(%)	棟数	比率(%)
熊本市中央区	旧耐震	2,736	9	736	5
	新耐震①	23,781	80	11,176	76
	新耐震②	3,357	11	2,800	19
	合計	29,874	100	14,712	100
熊本市東区	旧耐震	3,254	8	567	4
	新耐震①	33,684	78	8,931	68
	新耐震②	6,272	15	3,578	27
	合計	43,210	100	13,076	100
嘉島町	旧耐震	993	24	52	4
	新耐震①	2,636	64	879	65
	新耐震②	497	12	426	31
	合計	4,126	100	1,357	100
益城町	旧耐震	2,734	21	194	5
	新耐震①	9,172	70	2,556	71
	新耐震②	1,241	9	829	23
	合計	13,147	100	3,579	100
西原村	旧耐震	1,091	26	66	5
	新耐震①	2,690	63	948	68
	新耐震②	533	12	384	27
	合計	4,314	100	1,398	100
南阿蘇村	旧耐震	2,392	25	147	7
	新耐震①	7,046	73	1,744	85
	新耐震②	280	3	160	8
	合計	9,718	100	2,051	100

表 4.1.2-14 木造の建築年代別被害区分別棟数

市町村	建築年代	無被害	被害小	被害中	被害大	計
熊本市中央区	旧耐震	2,153	527	52	4	2,736
	新耐震①	19,503	3,678	578	22	23,781
	新耐震②	3,250	87	16	4	3,357
	計	24,906	4,292	646	30	29,874
熊本市東区	旧耐震	2,005	977	2,555	17	3,254
	新耐震①	22,806	8,086	2,670	122	33,684
	新耐震②	6,076	154	37	5	6,272
	計	30,887	9,217	5,262	144	43,210
嘉島町	旧耐震	494	307	129	63	993
	新耐震①	1,648	618	258	112	2,636
	新耐震②	478	14	23	3	497
	計	2,620	939	410	178	4,126
益城町	旧耐震	1,312	606	399	417	2,734
	新耐震①	5,119	1,847	1,186	1,020	9,172
	新耐震②	1,146	55	15	25	1,241
	計	7,577	2,508	1,600	1,462	13,147
西原村	旧耐震	544	318	136	93	1,091
	新耐震①	1,748	565	299	78	2,690
	新耐震②	488	28	11	6	533
	計	2,780	911	446	177	4,314
南阿蘇村	旧耐震	1,911	391	55	35	2,392
	新耐震①	5,844	900	191	111	7,046
	新耐震②	253	18	2	7	280
	計	8,008	1,309	248	153	9,718

表 4.1.2-15 木造の建築年代別被害区分別棟数の比率

市町村	建築年代	無被害	被害小	被害中	被害大	計
熊本市中央区	旧耐震	78.7%	19.3%	1.9%	0.1%	100.0%
	新耐震①	82.0%	15.5%	2.4%	0.1%	100.0%
	新耐震②	96.8%	2.6%	0.5%	0.1%	100.0%
熊本市東区	旧耐震	61.6%	30.0%	78.5%	0.5%	100.0%
	新耐震①	67.7%	24.0%	7.9%	0.4%	100.0%
	新耐震②	96.9%	2.5%	0.6%	0.1%	100.0%
嘉島町	旧耐震	49.7%	30.9%	13.0%	6.3%	100.0%
	新耐震①	62.5%	23.4%	9.8%	4.2%	100.0%
	新耐震②	96.2%	2.8%	4.6%	0.6%	100.0%
益城町	旧耐震	48.0%	22.2%	14.6%	15.3%	100.0%
	新耐震①	55.8%	20.1%	12.9%	11.1%	100.0%
	新耐震②	92.3%	4.4%	1.2%	2.0%	100.0%
西原村	旧耐震	49.9%	29.1%	12.5%	8.5%	100.0%
	新耐震①	65.0%	21.0%	11.1%	2.9%	100.0%
	新耐震②	91.6%	5.3%	2.1%	1.1%	100.0%
南阿蘇村	旧耐震	79.9%	16.3%	2.3%	1.5%	100.0%
	新耐震①	82.9%	12.8%	2.7%	1.6%	100.0%
	新耐震②	90.4%	6.4%	0.7%	2.5%	100.0%

表 4.1.2-16 非木造の建築年代別被害区分別棟数の比率

市町村	建築年代	無被害	被害小	被害中	被害大	計
熊本市中央区	旧耐震	716	18	2	0	736
	新耐震①	10,928	229	19	0	11,176
	新耐震②	2,785	14	1	0	2,800
	計	14,429	261	22	0	14,712
熊本市東区	旧耐震	541	24	2	0	567
	新耐震①	8,575	305	45	6	8,931
	新耐震②	3,535	38	5	0	3,578
	計	12,651	367	52	6	13,076
嘉島町	旧耐震	44	6	2	0	52
	新耐震①	832	41	6	0	879
	新耐震②	418	6	2	0	426
	計	1,294	53	10	0	1,357
益城町	旧耐震	179	12	3	0	194
	新耐震①	2,414	100	41	1	2,556
	新耐震②	814	14	1	0	829
	計	3,407	126	45	1	3,579
西原村	旧耐震	55	7	3	1	66
	新耐震①	855	77	12	4	948
	新耐震②	365	15	3	1	384
	計	1,275	99	18	6	1,398
南阿蘇村	旧耐震	136	11	0	0	147
	新耐震①	1,653	79	9	3	1,744
	新耐震②	154	4	0	2	160
	計	1,943	94	9	5	2,051

表 4.1.2-17 非木造の建築年代別被害区分別棟数の比率

市町村	建築年代	無被害	被害小	被害中	被害大	計
熊本市中央区	旧耐震	97.3%	2.4%	0.3%	0.0%	100.0%
	新耐震①	97.8%	2.0%	0.2%	0.0%	100.0%
	新耐震②	99.5%	0.5%	0.0%	0.0%	100.0%
熊本市東区	旧耐震	95.4%	4.2%	0.4%	0.0%	100.0%
	新耐震①	96.0%	3.4%	0.5%	0.1%	100.0%
	新耐震②	98.8%	1.1%	0.1%	0.0%	100.0%
嘉島町	旧耐震	84.6%	11.5%	3.8%	0.0%	100.0%
	新耐震①	94.7%	4.7%	0.7%	0.0%	100.0%
	新耐震②	98.1%	1.4%	0.5%	0.0%	100.0%
益城町	旧耐震	92.3%	6.2%	1.5%	0.0%	100.0%
	新耐震①	94.4%	3.9%	1.6%	0.0%	100.0%
	新耐震②	98.2%	1.7%	0.1%	0.0%	100.0%
西原村	旧耐震	83.3%	10.6%	4.5%	1.5%	100.0%
	新耐震①	90.2%	8.1%	1.3%	0.4%	100.0%
	新耐震②	95.1%	3.9%	0.8%	0.3%	100.0%
南阿蘇村	旧耐震	92.5%	7.5%	0.0%	0.0%	100.0%
	新耐震①	94.8%	4.5%	0.5%	0.2%	100.0%
	新耐震②	96.3%	2.5%	0.0%	1.3%	100.0%

表 4.1.2-18 木造の判読結果と住宅統計の比較

市町村	年代	判読		住宅統計	
		棟数	比率(%)	住宅数	比率(%)
熊本市中央区	旧耐震	2,736	9	9,130	43
	新耐震①	23,781	80	7,650	36
	新耐震②	3,357	11	4,370	21
	合計	29,874	100	21,150	100
熊本市東区	旧耐震	3,254	8	9,410	31
	新耐震①	33,684	78	13,920	46
	新耐震②	6,272	15	6,890	23
	合計	43,210	100	30,220	100
嘉島町	旧耐震	993	24	データなし	
	新耐震①	2,636	64		
	新耐震②	497	12		
	合計	4,126	100		
益城町	旧耐震	2,734	21	2,250	24
	新耐震①	9,172	70	4,100	45
	新耐震②	1,241	9	2,860	31
	合計	13,147	100	9,210	100
西原村	旧耐震	1,091	26	データなし	
	新耐震①	2,690	63		
	新耐震②	497	12		
	合計	4,278	100		
南阿蘇村	旧耐震	2,392	25	データなし	
	新耐震①	7,046	73		
	新耐震②	280	3		
	合計	9,718	100		

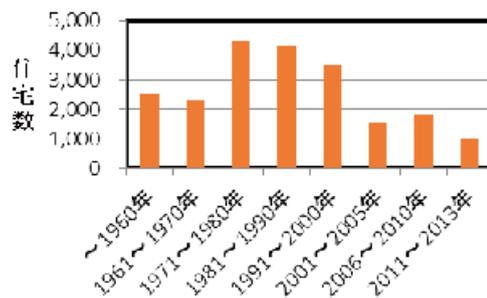


図 4.1.2-11 熊本市中央区の年代別住宅数

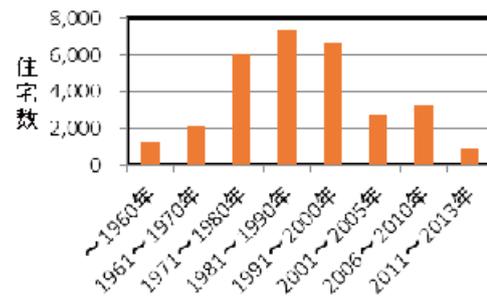


図 4.1.2-12 熊本市東区の年代別住宅数

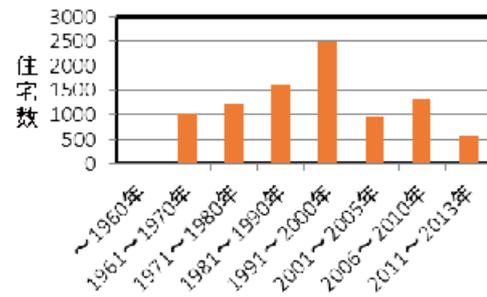


図 4.1.2-13 益城町の年代別住宅数

4.1.3 試作の方法

被害関数は、上記の熊本地震の航空写真判読結果および下村ほか(2016)による新潟県中越地震(以下、中越地震)の建物被害情報を付加して検討する。

試作の方針は以下の通りである。

- ・対象とする被災度は全壊とする。
- ・入力強震動指標は震度とする。
- ・建物構造は木造および非木造の2区分とする。
- ・建築年代は旧耐震(1980年以前)、新耐震①(1981～1999年)および新耐震②(2000年以降)の3区分とする。

(1) 全壊率データ作成

被害関数は、震度と全壊率の関係で検討することとし、全壊率は式(4.1.3-1)により、建物構造別および建築年代別に算出した。例えば、木造旧耐震の全壊率は、(250 mメッシュ内の木造旧耐震全壊棟数)/(250 mメッシュ内の木造旧耐震建物総棟数)となる。

$$\text{全壊率} = (\text{250 mメッシュ内の全壊棟数}) / (\text{250 mメッシュ内の建物総棟数}) \quad (4.1.3-1)$$

ここで、熊本地震の全壊棟数は、被害判読結果の被害中と大の合計とし、図4.1.2-1に示す建物ポイントのGISデータを250 mメッシュに集計して、250 mメッシュ全壊率を算出した。一方、中越地震は、罹災証明と固定資産税調書の家屋台帳との照合により、建物1棟毎に、建物住所(位置)、建物被害、建物構造および建築年の情報を整備し、図4.1.3-1に示すようにGIS化し、これを250 mメッシュに集計して、250 mメッシュ全壊率を算出した。

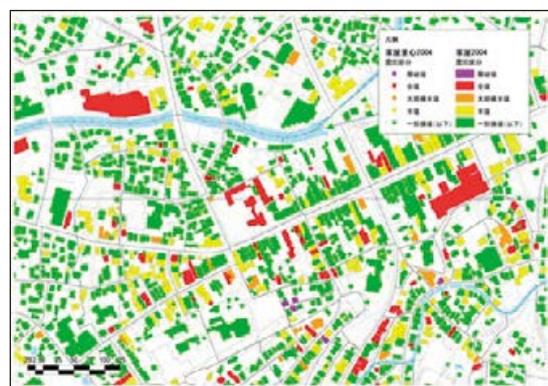


図 4.1.3-1 個別建物 GIS ポリゴンデータ

(2) 全壊率と震度の関係

250 mの建物構造別および建築年別の全壊率と震度の間を調べ、その結果を図4.1.3-2～図4.1.3-6に示す。なお、検討にあたっては、表4.1.3-1に示す地震観測点から半径1 km以内の250 mメッシュデータを採用し、また、建物総棟数が少ないと全壊率の信頼性が低くなることから、建物構造および建築年代別の建物総棟数が10棟以上の250 mメッシュデータを採用した。

ここで、250 mメッシュの震度は、K-NET、KiK-net、地方公共団体および気象庁の震度計データから、6章で述べる方法と同様に観測点の震度を地表最大速度に変換後、J-SHISで公開している微地形区分を用いた地盤増幅率を除することで工学的基盤最大速度を求めた後、逆距離加重法を用いて空間補間を行い、さらに地盤増幅率を乗じて地表最大速度を算出後、変換式を用いて震度に変換したものを採用した。

図4.1.3-2から木造旧耐震の全壊率と震度の間をみると、震度が6.5以上になると、全壊率が0.7以上と大きくなる。また、熊本地震と中越地震を比較すると、同一震度でも熊本地震の全壊率が、中越地震よりも大きい傾向がある。図4.1.3-3から木造新耐震①(1981～1999年)の全壊率と震度の間をみると、震度が6.5以上になると、全壊率が大きくなるが、旧耐震に比べれば小さい。また、旧耐震と同様に、同一震度でも熊本地震の全壊率が、中越地震よりも大きい傾向がある。

図4.1.3-4から木造新耐震②(2000年～)の全壊率と震度の間をみると、全壊率は木造新耐震①(1981～1999年)に比べて、同一震度でも明らかに小さい。

図4.1.3-5から非木造旧耐震の全壊率と震度の間をみると、震度が大きくなると全壊率も大きくなるが、震度が6.5以上の全壊率のデータが少ないため、この震度での全壊率の傾向は不明確である。非木造の新耐震は、新耐震②(2000年～)のデータ数が極端に少ないため、2区分していない。

図4.1.3-6から非木造新耐震の全壊率と震度の間をみると、全壊率は非木造旧耐震に比べて、同一震度でも明らかに小さい。

表 4.1.3-1 地震観測点一覧

地震名	地震観測所名	市区町村
熊本地震	熊本中央区大江	熊本市中央区
	KMM006 (熊本)	熊本市東区
	熊本東区佐土原	熊本市東区
	嘉島町上島	嘉島町
	KMMH16 (益城)	益城町
	西原村小森	西原村
	益城町惣領	益城町
	KMMH06 (白水)	南阿蘇村
	南阿蘇村河陽	南阿蘇村
	南阿蘇村中松	南阿蘇村
	南阿蘇村河陰	南阿蘇村
	南阿蘇村吉田	南阿蘇村
	南阿蘇村中村	南阿蘇村
中越地震	NIG016 (寺泊)	長岡市
	NIG017 (長岡)	長岡市
	NIG028 (長岡支所)	長岡市
	長岡市幸町	長岡市
	川口町川口	長岡市
	小国町法坂	長岡市
	NIG019 (小千谷)	小千谷市
	小千谷市城内	小千谷市

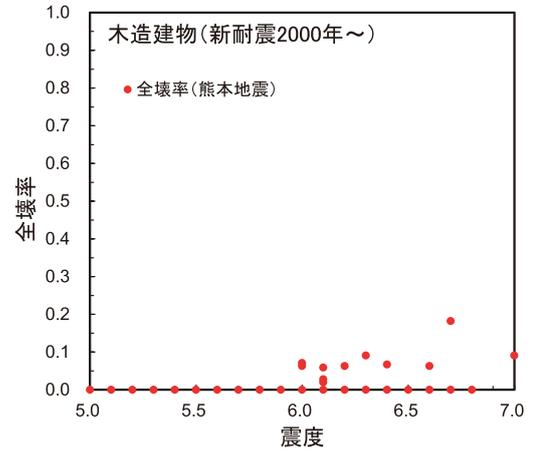


図 4.1.3-4 木造新耐震②の震度と全壊率

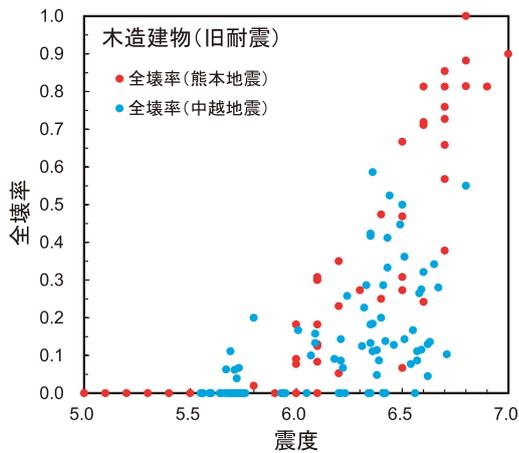


図 4.1.3-2 木造旧耐震の震度と全壊率

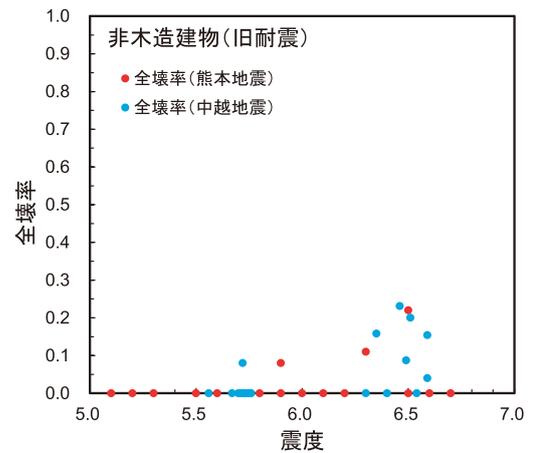


図 4.1.3-5 非木造旧耐震の震度と全壊率

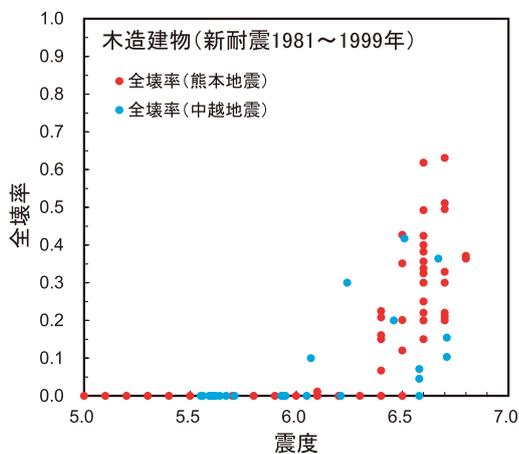


図 4.1.3-3 木造新耐震①の震度と全壊率

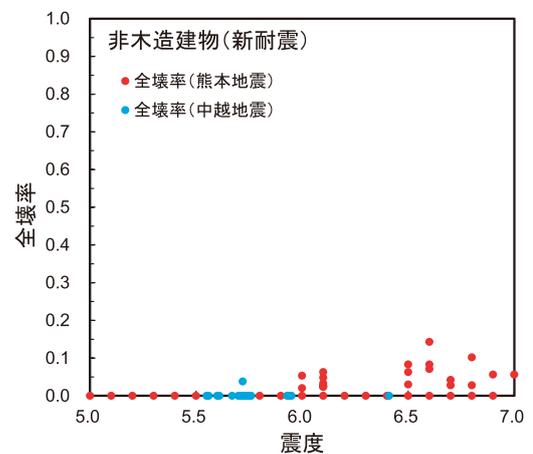


図 4.1.3-6 非木造新耐震の震度と全壊率

(3) 木造および非木造の被害関数

図 4.1.3-2 ～ 図 4.1.3-6 に示すデータを基に，全壊率 P と震度 I との関係を平均 λ ，標準偏差 ξ を用いて，以下の累積正規分布曲線 Φ に近似する式 (4.1.3-2) により，建物構造および建築年代別における被害関数を検討し，その結果を表 4.1.3-2，図 4.1.3-7 ～ 図 4.1.3-8 に示す。

$$P = \Phi\left[\left(\frac{I - \lambda}{\xi}\right)\right] \quad (4.1.3-2)$$

図 4.1.3-7 から木造の被害関数をみると，同じ震度でも，建築年代が新しいと被害率は小さく，2000 年以降の建物は明らかに被害率が低い。また，旧耐震・新耐震いずれにおいても被害関数の立ち上がりがゆるやかで，木造の旧耐震と新耐震① (1981 ～ 1999 年) は震度 6.3 程度から被害率が上昇し，新耐震② (2000 年以降) は震度 6.5 程度から上昇する傾向がある。

図 4.1.3-8 から非木造の被害関数をみると，木造の新耐震 (2000 年以降) と同様な傾向にある。

表 4.1.3-2 木造および非木造の被害関数のパラメータ

構造	年代	λ	ξ
木造	旧耐震	6.60	0.25
	新耐震①	6.79	0.28
	新耐震②	7.27	0.35
非木造	旧耐震	7.14	0.33
	新耐震	7.27	0.34

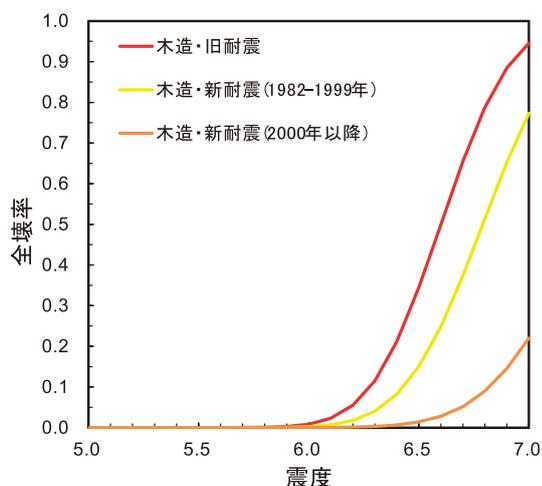


図 4.1.3-7 木造の被害関数

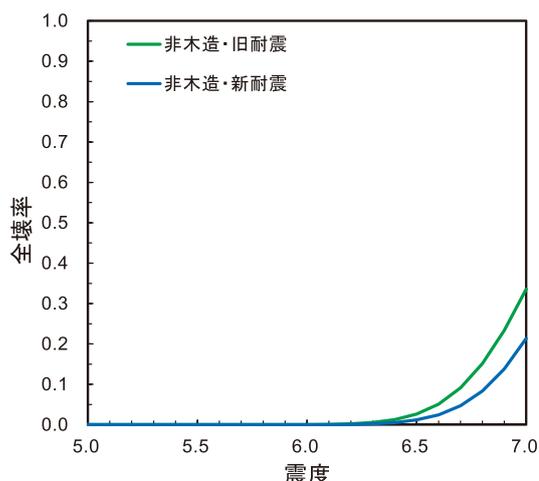


図 4.1.3-8 非木造の被害関数

(4) 被害地震への適用

表 4.1.3-2 の被害関数を熊本地震，中越地震，岩手・宮城内陸地震，東日本太平洋沖，鳥取中部地震および大阪府北部地震に適用して，全壊棟数を推定し，実被害と比較した。実被害は，消防庁あるいは自治体が公表している住家の全壊棟数と，中越地震，岩手・宮城内陸地震および東日本太平洋沖地震については，罹災証明から集計した全壊棟数を併せて示す。

なお，罹災証明の全壊棟数は，住家と非住家の合計全壊棟数であることから，実被害の比較は罹災証明全壊棟数との比較とし，罹災証明全壊棟数がない場合は住家全壊棟数との比較とした。

① 熊本地震

熊本地震は，熊本市他計 11 市町村を対象とし，推定全壊棟数と熊本県災害対策本部 (2016) による住家全壊棟数の比較を表 4.1.3-3 に示す。また，推定全壊棟数分布を図 4.1.3-9，実被害全壊棟数分布を図 4.1.3-10 に示す。なお，実被害全壊棟数分布は，航空写真判読の被害中の 1/2 と被害大の合計数を全壊とした分布である。

表 4.1.3-3 から，震度 7 を記録した益城町および西原村は，推定全壊棟数は実被害より約 5 ～ 7% 多い程度で，ほぼ近似している。推定全壊棟数が実被害より多い市町村は，熊本市および宇土市が挙げられ，熊本市は実被害の約 170%，宇土市は約 220% である。一方，それ以外の 7 市町村は，推定全壊棟数が実被害より少なく，大津町の 80% を除くと，

残り6市町村の推定全壊棟数は実被害の20%以下であり、特に、宇城市は4%、南阿蘇村は3%と極端に少ない。この極端に少ない理由としては、宇城市および南阿蘇村の推定震度は6弱であるが、実際にはこの推定震度より、揺れが大きかった可能性がある。また、嘉島町、御船町および甲佐町も同様に揺れが大きかった可能性が考えられる。

図4.1.3-9および図4.1.3-10から、震度7を記録した益城町および西原村の推定全壊棟数分布は実被害全壊棟数分布に調和的である。

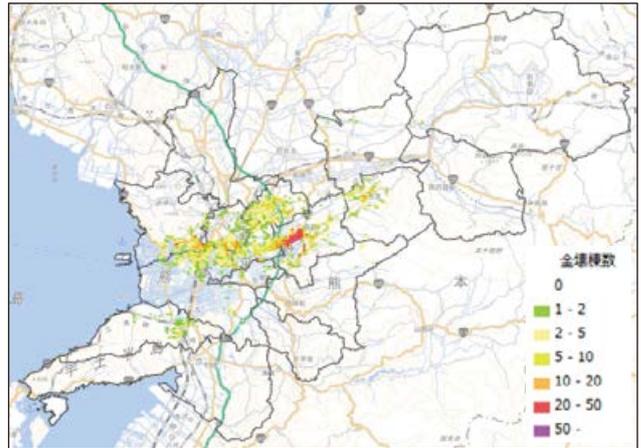


図4.1.3-10 実被害全壊棟数分布

表4.1.3-3 推定全壊棟数と実被害の比較

市町村	推定全壊棟数			住家全壊棟数
	木造	非木造	計	
熊本市	4,052	71	4,123	2,383
阿蘇市	19	0	19	114
宇城市	18	0	18	435
宇土市	230	4	234	106
益城町	2,664	65	2,729	2,557
嘉島町	48	1	49	272
御船町	68	0	68	736
甲佐町	12	0	12	114
大津町	80	1	81	117
西原村	520	12	532	505
南阿蘇村	18	0	18	564
計	7,729	154	7,883	7,903

② 中越地震

中越地震は、全建物の建物被害情報および建物属性情報(位置・構造・建築年)を収集した新潟県の旧長岡市、旧川口町および小千谷市を対象とし、推定全壊棟数と消防庁(2004)による住家全壊棟数、防災科学技術研究所の調査による罹災証明全壊棟数の比較を表4.1.3-4に示す。また、推定震度分布を図4.1.3-11、推定全壊棟数分布を図4.1.3-12、罹災証明全壊棟数分布を図4.1.3-13に示す。

表4.1.3-4から、旧長岡市の推定全壊棟数は660棟で、罹災証明全壊棟数1,288棟の約50%、旧川口町の推定全壊棟数は499棟で、罹災証明全壊棟数1,233棟の約40%と、両者とも罹災証明全壊棟数よりも少なく推定される。これに対し、小千谷市の推定全壊棟数は1,183棟で、罹災証明全壊棟数1,304棟の約90%と、旧長岡市および旧川口町に比べれば比較的近似している。旧長岡市が少ない理由は、図4.1.3-13から旧長岡市の実被害全壊棟数の分布をみると、震度を6弱と推定した区域に全壊棟数が多数分布していることから、これら区域の実際の震度は、推定した6弱より大きかったと考えられる。また、旧川口町についても、町内約4,700棟の約30%が全壊であることから、震度7の区域が推定よりも広い可能性がある。

図4.1.3-12および図4.1.3-13から、小千谷市の推定全壊棟数分布は、実被害全壊棟数分布に調和的である。

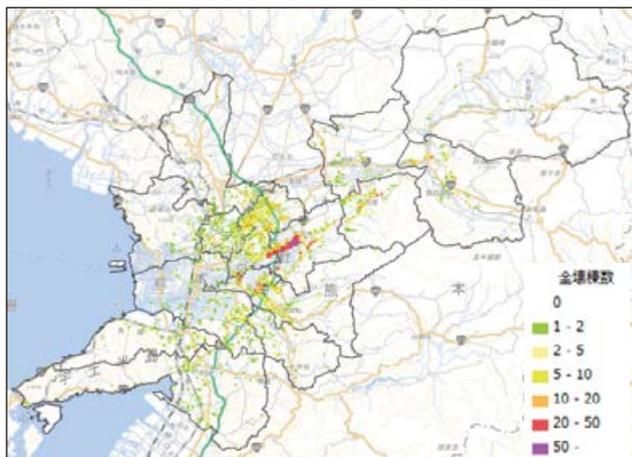


図4.1.3-9 推定全壊棟数分布

表 4.1.3-4 推定全壊棟数と実被害の比較

市町村	推定全壊棟数			住家 全壊棟数	罹災証明 全壊棟数
	木造	非木造	計		
旧長岡市	654	6	660	927	1,288
旧川口町	484	15	499	606	1,223
小千谷市	1,162	21	1,183	622	1,387
計	2,300	42	2,342	2,155	3,898

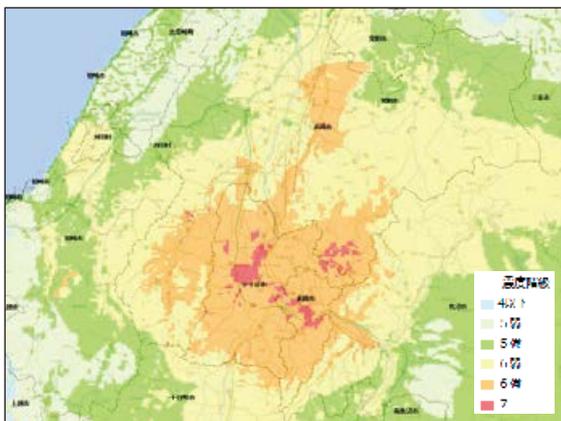


図 4.1.3-11 推定震度分布

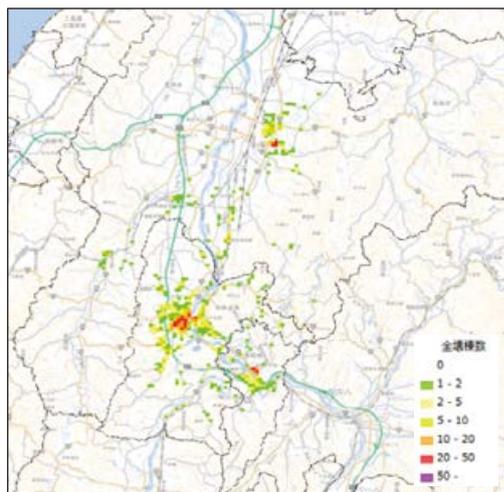


図 4.1.3-12 推定全壊棟数分布

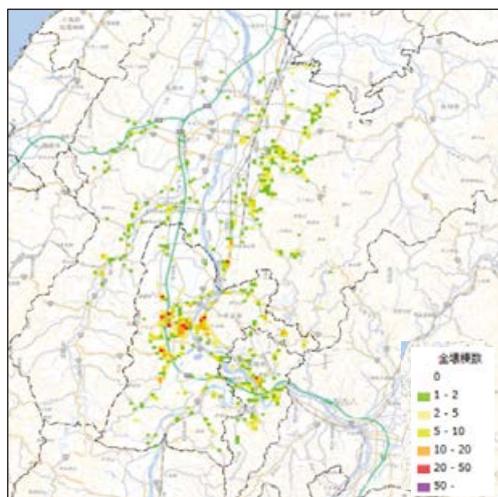


図 4.1.3-13 罹災証明全壊棟数分布

③ 岩手・宮城内陸地震

岩手・宮城内陸地震は、全建物の建物被害情報および建物属性情報を収集した宮城県栗原市を対象とし、推定全壊棟数と消防庁(2008)による住家全壊棟数、防災科学技術研究所の調査による罹災証明全壊棟数の比較を表 4.1.3-5 に示す。また、推定震度分布と罹災証明全壊棟数分布を合わせて図 4.1.3-14 に示す。

表 4.1.3-5 から、栗原市の推定全壊棟数は 29 棟で、罹災証明全壊棟数 201 棟の約 10% と極めて少ない。

なお、罹災証明全壊棟数建物 201 棟のうち、約 160 棟がトタン製納屋などの耐震性が極めて低い非住家建物である。

表 4.1.3-5 推定全壊棟数と実被害の比較

市町村	推定全壊棟数			住家 全壊棟数	罹災証明 全壊棟数
	木造	非木造	計		
栗原市	29	0	29	27	201

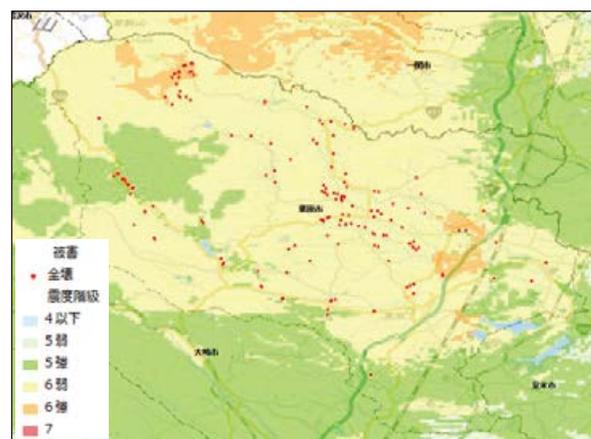


図 4.1.3-14 推定震度分布と罹災証明全壊棟数分布

④ 東日本太平洋沖地震

東日本太平洋沖地震は、全建物の建物被害情報および建物属性情報を収集した栃木県の宇都宮市と那珂川町を対象とし、推定全壊棟数と消防庁(2018b)による住家全壊棟数、防災科学技術研究所の調査による罹災証明全壊棟数の比較を表 4.1.3-6 に示す。また、宇都宮市の推定震度分布と罹災証明全壊棟数分布を合わせて図 4.1.3-15 に、那珂川町の推定震度分布と罹災証明全壊棟数分布を合わせて図 4.1.3-16 に示す。

表 4.1.3-6 から、宇都宮市の推定全壊棟数は 24 棟で、罹災証明全壊棟数 193 棟の約 12% と、那珂川町の推定全壊棟数は 42 棟で、罹災証明全壊棟数 139

棟の約30%であり、両者とも推定数は少ない。

なお、宇都宮市の罹災証明全壊棟数建物棟193棟のうち約150棟が、那珂川町では罹災証明全壊棟数139棟のうち約100棟が、耐震性が極めて低い石積造建物である。

表 4.1.3-6 推定全壊棟数と実被害の比較

市町村	推定全壊棟数			住家全壊棟数	罹災証明全壊棟数
	木造	非木造	計		
宇都宮市	24	0	24	9	193
那珂川町	42	0	42	7	139
計	66	0	66	16	332

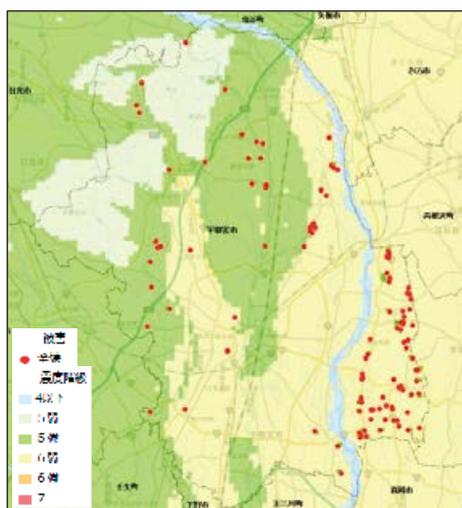


図 4.1.3-15 宇都宮市の推定震度分布と罹災証明全壊棟数分布

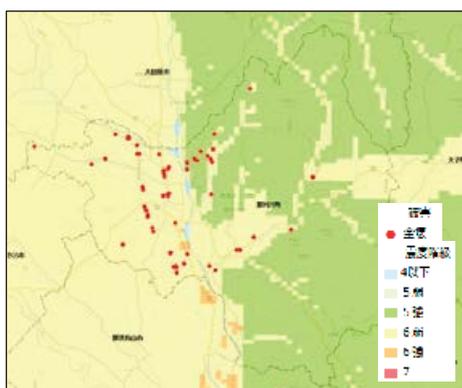


図 4.1.3-16 那珂川町の推定震度分布と罹災証明全壊棟数分布

⑤ 鳥取中部地震

鳥取中部地震は、鳥取県の倉吉市と北栄町を対象とし、推定全壊棟数と消防庁(2018c)による住家全壊棟数の比較を表 4.1.3-7 に示す。また、推定震度分布と実被害建物の分布を合わせて図 4.1.3-17 に、

推定全壊棟数分布を図 4.1.3-18 に示す。なお、図 4.1.3-17 に示す実被害建物は、現地調査で被害を目視判定したものであり、被害大が全壊に相当する。

表 4.1.3-7 から、倉吉市の推定全壊棟数は497棟で、住家全壊棟数が4棟であり、極端に過大に推定されている。また、図 4.1.3-18 の推定全壊棟数分布の中で、推定全壊棟数の多い区域については、現地調査による全壊相当の建物は2棟であったことから、実際の揺れは推定震度よりかなり小さいと考えられる。

北栄町の推定全壊棟数は3棟で、住家全壊棟数13棟の約20%である。

表 4.1.3-7 推定全壊棟数と実被害の比較

市町村	推定全壊棟数			住家全壊棟数
	木造	非木造	計	
倉吉市	651	46	697	4
北栄町	3	0	3	13
計	654	46	700	17

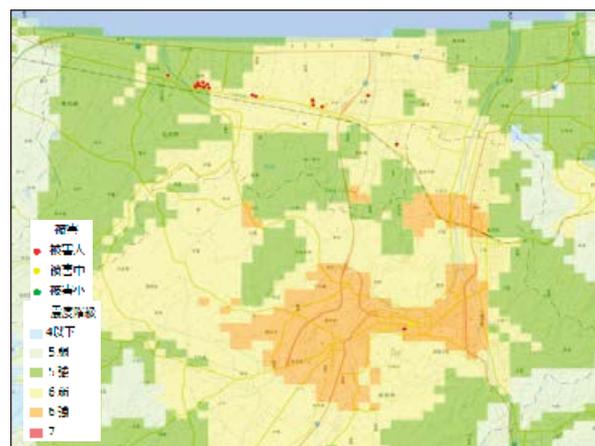


図 4.1.3-17 推定震度分布と実被害全壊棟数

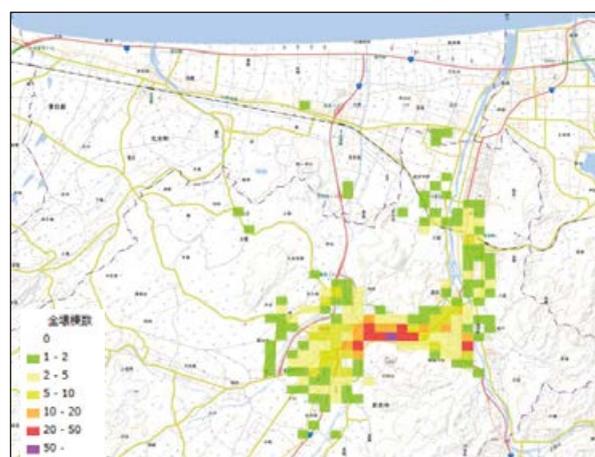


図 4.1.3-18 推定全壊棟数分布

⑥ 大阪府北部地震

大阪府北部地震は、図 4.1.3-19 の推定震度分布の紫線の内側あたるとして、推定全壊棟数と大阪府 (2018) による住家全壊棟数の比較を表 4.1.3-8 に示す。

表 4.1.3-8 から、12 市合計でみると、推定全壊棟数は 31 棟で、住家全壊棟数の約 1.7 倍多く推定されている。

表 4.1.3-8 推定全壊棟数と実被害の比較

市町村	推定全壊棟数			住家全壊棟数
	木造	非木造	計	
大阪市	0	0	0	0
豊中市	0	0	0	3
吹田市	0	0	0	0
高槻市	13	0	13	11
守口市	0	0	0	0
枚方市	6	0	6	1
茨木市	11	0	11	3
寝屋川市	0	0	0	0
箕面市	0	0	0	0
門真市	0	0	0	0
摂津市	0	0	0	0
島本町	0	0	0	0
計	31	0	31	18

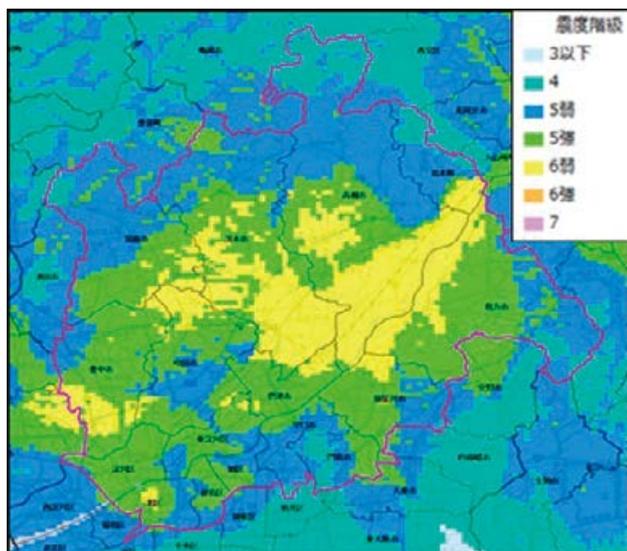


図 4.1.3-19 推定震度分布

参考文献

中央防災会議 (2004) : 首都直下地震に係る被害想定手法について, <http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/pdf/shiryoku3.pdf> (2018 年 7 月 16 日確認)

中央防災会議 (2012) : 南海トラフの巨大地震建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20120829_gaiyou.pdf (2018 年 7 月 16 日確認)

藤原広行・中村洋光・高橋郁夫 (2016) : 2016 年熊本地震におけるリアルタイム被害推定, 日本地震工学会 - 大会 - 2016 梗概集, P2-28.

堀江啓 (2004) : 阪神・淡路大震災における木造建物の層破壊被害, 地震ジャーナル, No.38, pp.30-40.

熊本県災害対策本部 (2016) : 熊本地震に係る被害状況等について (第 111 報) http://www.pref.kumamoto.jp/common/UploadFileOutput.ashx?c_id=3&id=15459&sub_id=114&flid=73819 (2019 年 1 月 12 日確認)

熊本県 (2018) : 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震等に係る被害状況について (第 285 報) http://www.pref.kumamoto.jp/kiji_15459.html (2019 年 1 月 12 日確認)

翠川三郎・伊東祐記・三浦弘之 (2011) : 兵庫県南部地震以降の被害地震データに基づく建物被害関数の検討, 日本地震工学会論文集, 第 11 巻, 第 4 号, p34-47.

村尾修・山崎文雄 (2000) : 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, No.527, pp.189-196.

村尾修・山崎文雄 (2002) : 震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.185-192.

大阪府 (2018) : 大阪府北部を震源とする地震, 人的被害および住家被害 (速報値) http://www.pref.osaka.lg.jp/shobobosai/osaka_jishin/higai.html (2019 年 1 月 12 日確認)

下村博之・藤原広行・中村洋光・門馬直一・山田哲也・藤澤誠二 (2016) : 新潟県中越地震と岩手・宮城内陸地震の震度分布と建物被害の関係, 日本地震工学会 - 大会 - 2016 梗概集, P2-23.

消防庁 (2004) : 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越

地震（確定報）<http://www.fdma.go.jp/bn/2009/detail/581.html>（2019年1月12日確認）

消防庁（2010）：平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震（第79報）<http://www.fdma.go.jp/bn/2010/detail/639.html>（2019年1月12日確認）

消防庁（2018a）：熊本県熊本地方を震源とする地震（第120報）<http://www.fdma.go.jp/>（2019年1月12日確認）

消防庁（2018b）：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）について（第158報）

消防庁（2018c）：鳥取県中部を震源とする地震（第38報）<http://www.fdma.go.jp/bn/2016/detail/977.html>, http://www.fdma.go.jp/bn/higaihou_new.html（2019年1月12日確認）

総務省統計局（2013）：平成25年住宅・土地調査，<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukuei=00200522&tstat=000001063455>（2019年1月12日確認）

総務省統計局（2017）：平成29年度固定資産概要調書，<http://www.soumu.go.jp/main-sosiki/jichi-zeisei/czaisei/czaisei-seido/ichiran08-h29-oo-html>, <http://www.bouai.go.jp/jishin/syuto/pdf/shiryou3.pdf>（2019年1月12日確認）

4.2 繰り返し地震に対する建物被害推定手法の開発

4.2.1 概要

一般に被害関数は、構造種別や建築年代などの耐震性能に影響を与えると考えられる建築属性により建物を区分して設定されている。主に経年劣化などにより耐震性が低下したと診断された住宅の被害関数を提案した研究（更谷ほか，2010）もあるが，2016年熊本地震で震度7に至る強い揺れが続けて発生したように，被害調査や診断を実施する時間もない短い期間に繰り返し揺れを受ける影響を反映する方法は示されていない。

一方，2016年熊本地震では，4月14日に発生したM6.5の地震（以下，前震）の直後である4月15日と，4月16日に発生したM7.3の地震（以下，本震）直後に被災地の空中写真が撮影され，建物ごとに被害の目視判読がなされた。これらのデータに基づき，益城町では前震直後と本震直後の判読被害レベルを比較し，半数近くの建物の被害レベルがあがったことが報告された（門馬ほか，2016）ほか，判読結果と現地目視調査結果との比較，比較的建物被害率が高い熊本市東区など7市区町村を対象に，判読結果と強震観測記録を補間して250mメッシュ単位で推定した地震動強さとの関係も検証されている（内藤ほか，2018）。

さらには，個々の木造住宅の耐震性が強い揺れの繰り返しで徐々に損なわれる現象については，耐震構造部材である耐震壁を繰り返し裁荷した構造実験から得られた劣化挙動を表現できる解析モデル（五十田・河合，2007，人見ほか，2009）が提案されているほか，強い揺れを受けたあとの残余性能を評価するための研究（橋本ほか，2016）もなされている。

そこで，地震動強さの分布と被害関数を用いた建物の被害棟数の推定の枠組みにおいて，短期間に繰り返し強い揺れを受けたときの影響を反映する方法を開発した。

そのために，まずは，内藤ほか（2018）のデータを利用して，前震後の判読被害別に本震における揺れの強さと被害率の関係を整理し，見出された被害関数の変化を表現できる被害棟数の推定方法を検討した。

開発した手法は，次の2つの特徴をもつ。すなわち，①被害棟数の累積を考慮する，②過去の揺れによる耐震性の低下を考慮する。

②の効果を表現するために、2回目以後の揺れに対する被害推定では、それまでの揺れによりある程度以上の被害を受けたと推定できる建物について、木造住宅の耐震性を低下させた被害関数を適用することにした。

4.2.2 空中写真の判読による熊本地震の益城町の住宅被害の分析

(1) 空中写真による被害判読の概要

本検討では、最初に、内藤ほか(2018)で整備したデータのうち、益城町のデータを利用して、繰り返し強い揺れを受けることが被害関数に与える影響を確認した。

内藤ほか(2018)は、2016年熊本地震の前震と本震の直後で撮影された空中写真による被害判読データを用いて、それぞれ本震直後の被害判読レベルの発生割合と本震の地震動強さの関係を整理したもので、データの詳細も記述されている。ここでは以下の議論に必要な点を中心にその概要を示す。

前震直後の被害判読データの作成に利用した空中写真は、4月15日に取得された航空機オルソ画像とヘリコプターからの斜め撮影画像である。同じく本震後については、4月16日から20日にかけて撮影された航空機オルソ画像と、一部地域の航空機(4月19日撮影)とヘリコプター(4月16日撮影)からの斜め撮影画像である。各航空写真画像の解像度は20cm、ヘリコプター撮影画像の解像度は5cmである。

判読作業は、目視判断によって、棟単位で建物の状態を以下の4つの判読レベルに区分したものである。すなわち、航空写真では被害が確認できなかったものをLEVEL1(無被害)、屋根瓦の一部の落下が確認できたものをLEVEL2(被害小)、建物の外形の変化はないが壁面が落下または屋根瓦の大半が落下しているものをLEVEL3(被害中)、建物が傾斜している、層破壊がみられる、あるいは完全に倒壊しているものをLEVEL4(被害大)とした。

また、屋根にブルーシートがかかっている場合は、ブルーシートの面積が屋根全体の半分未満ならLEVEL2、半分以上ならLEVEL3とした。なお、LEVEL4の基準には建物位置のずれやねじれ等の形状変化が確認できる場合に加え、一部地域においては建物等を含む標高データである数値表層モデル(DSM)の値が本震前後で3m以上低下している場合

が含まれる。

これらの判読レベルと岡田・高井(1999)により提案されている被害パターンチャートとの対応は、概ねLEVEL1がD0、LEVEL2がD1、LEVEL3がD2からD3、LEVEL4がD4以上となる。

ここでは、これらの判読データを、世界測地系5次メッシュ(250mメッシュ)に割り付け、各メッシュの中心位置の座標が益城町に属するものを検討対象とした。

表4.2.2-1に前震直後、本震直後の画像から判読した各レベルの建物棟数を一覧に示す。また、図4.2.2-1、図4.2.2-2には250mメッシュに含まれる、それぞれLEVEL2以上、LEVEL3以上の建物棟数分布を図示した。

前震直後に比べて、本震直後で、LEVEL3以上の大きな被害を生じた建物が増加した様がよく表れている。一方、熊本県による罹災証明に基づく被害状況報告では全壊3,026棟^{注1}であった。これを本震直後の各判読レベルの被害棟数と比較すると、概ねLEVEL3とLEVEL4の和に相当している。とはいえ、LEVEL3の定義が厳密に全壊に一致するものではない点には留意されたい。なお、判読結果と実際の被害状況との関係には、内藤ほか(2018)が詳しく考察を加えている。

表 4.2.2-1 被害判読レベル別の建物棟数のまとめ

	LEVEL1	LEVEL2	LEVEL3	LEVEL4
前震直後	11733	2861	533	225
本震直後	9650	2607	1639	1456

(2) 地震動強さの推定方法

各判読レベルと地震動強さの関係を検討するにあたり、「リアルタイム被害推定システム(J-RISQ 地震速報)」(中村ほか, 2015)の推定結果を利用して、各データが属する250mメッシュ単位の推定地震動強さを求めた。

その計算過程の概要は、以下のとおりである。すなわち、観測点の計測震度を藤本・翠川(2005)の方法で地表最大速度(PGV)に変換後、若松・松岡(2008)による全国版地形・地盤分類250mメッシュマップから藤本・翠川(2006)の方法で算出した地盤増幅率

注1：平成28年熊本地震等に係る被害状況について【第238報】
平成29年5月12日発表

で除して工学的基盤最大速度を求め、逆距離加重法 (IDW) を用いて空間補間した。その後、先と同様の地盤増幅率、地表最大速度と計測震度の変換式により、地表の計測震度とした。

本研究で用いた益城町における前震と本震における推定震度の分布を図4.2.2-3に示す。

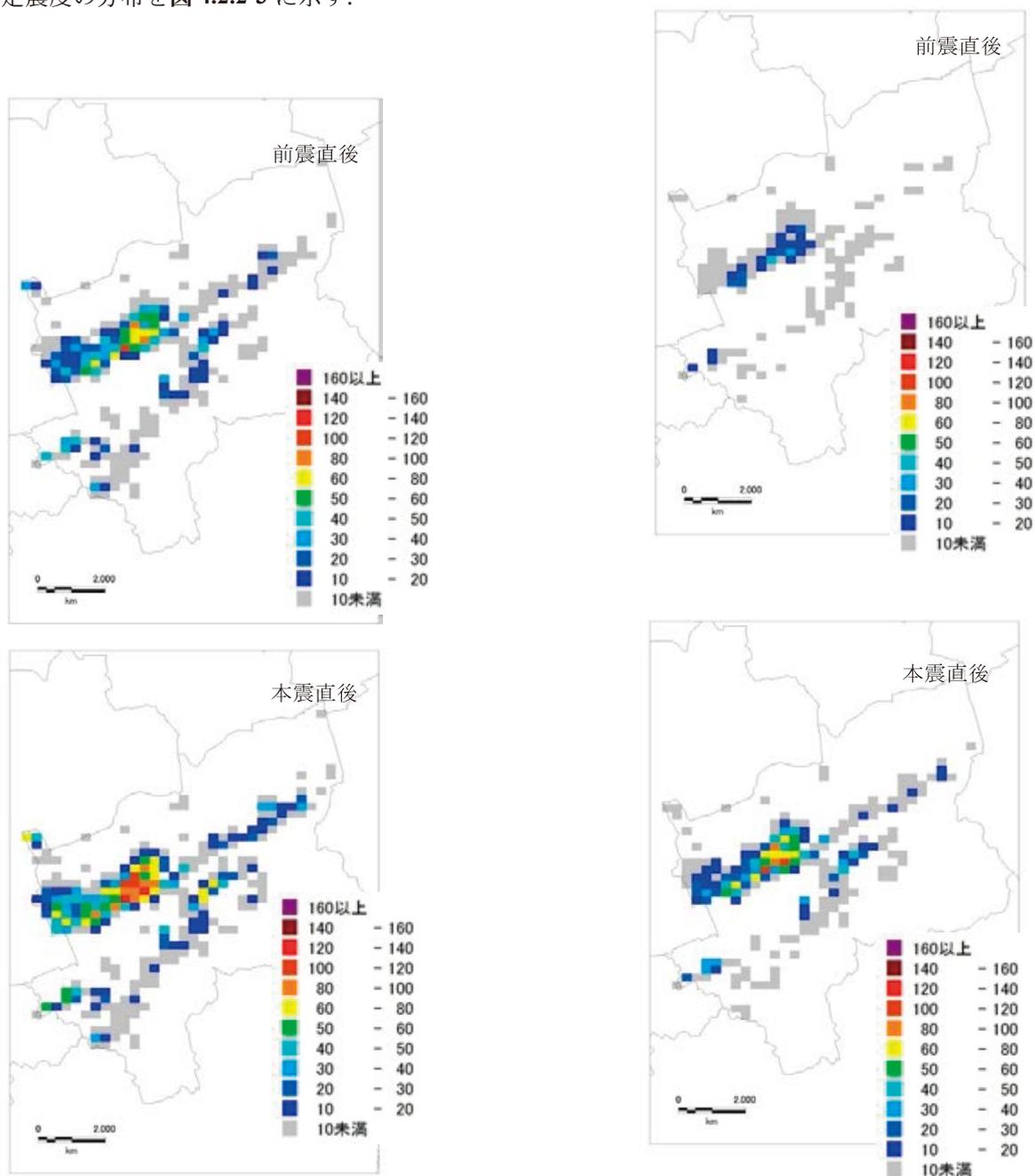


図 4.2.2-1 250 m メッシュ内の LEVEL2 以上の判読レベルの建物棟数分布の前震直後と本震直後の比較

図 4.2.2-2 250 m メッシュ内の LEVEL3 以上の判読レベルの建物棟数分布の前震直後と本震直後の比較

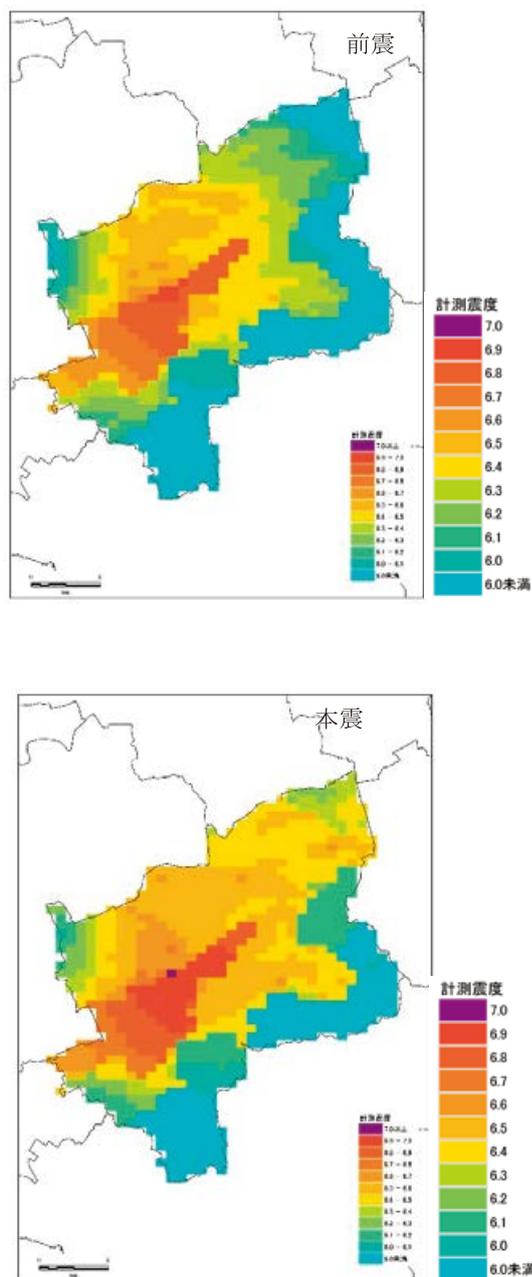


図 4.2.2-3 益城町の推定震度分布

(3) 前震後の被害レベルによる地震動強さと被害率の関係の違い

ここでは、表 4.2.2-1 に示す 15,352 データのうち、屋根形状、建築面積、基盤地図情報から木造と判断した建物の 13,674 データを分析対象とした。通常、被害関数を構築する場合、被害データを建物の建築年代や構造種別に分別して被害率を評価する。これは、対象となる建物群の耐震性能のばらつきをできる限り小さくして、被害発生率と地震動強さの関係を明確するためである。とはいえ、データの属性を

細分化するほど、各被害関数の評価に用いるデータが少なくなり、統計的な誤差が大きくなる。ここでの目的は、建物の耐震性の絶対値よりも、繰り返し揺れを受けることによる被害進行の程度の変化を確認することであることから、木造住宅を建築年代に分けず一括して扱い、前震直後の判読レベルによって、本震における計測震度と判読レベルの関係を比較した。

まずは前震直後の被害率と揺れの強さの関係をみるために、判読データを(2)に述べた方法で推定した前震の 0.1 刻みの計測震度ごとに仕分け、それぞれ各被害判読レベルのデータ数を総データ数で除して被害率を求めた。本震直後については、最初に前震直後の判読レベルでデータを分別してから、それぞれのデータ群ごとに、前震と同じ方法で被害率と揺れの強さの関係を求めた。つまり、本震の計測震度 0.1 ごとに、本震直後の各被害判読レベルのデータ数を総データ数で除して被害率を求めた。図 4.2.2-4 に、LEVEL2 以上、LEVEL3 以上、LEVEL4、それぞれについて、計測震度と被害率の関係を図示した。図 4.2.2-4 における×は、前震における計測震度と被害率の関係、同図に重ねた本震におけるそれは、前震直後の判読レベル別に色分け(白色○:LEVEL1, 灰色●:LEVEL2, 黒色●:LEVEL3)した丸印である。同図から、前震(×)と、前震で LEVEL1 (画像判読で被害が確認できないもの)であった木造住宅の本震(○)では、被害率と計測震度の関係の違いがわずかであることが見て取れる。これに対し、前震直後に画像判読で被害が確認されたもの、すなわち灰丸●と黒丸●は、同じ計測震度で比べると、前震(×)に比べて明らかに被害率が上昇しており、過去の揺れによって被害を生じた建物は、同程度の揺れでも被害が進行する可能性が高いことが確認できた。

一方、前震直後に被害が確認できない (LEVEL1) の建物について、さらに詳しく見れば、LEVEL2 以上率はわずかに本震の被害率が低い傾向がみられる。前震で被害を確認できなかったという情報を得た建物は、前震前に比べて、LEVEL2 に対して高い耐震性を有する可能性が高まったとも考えられるが、LEVEL3 以上率については明瞭でない。過去の揺れで被害が生じなかったという情報を、建物のリスク評価に反映すべきか否かは今後の検討としたい。

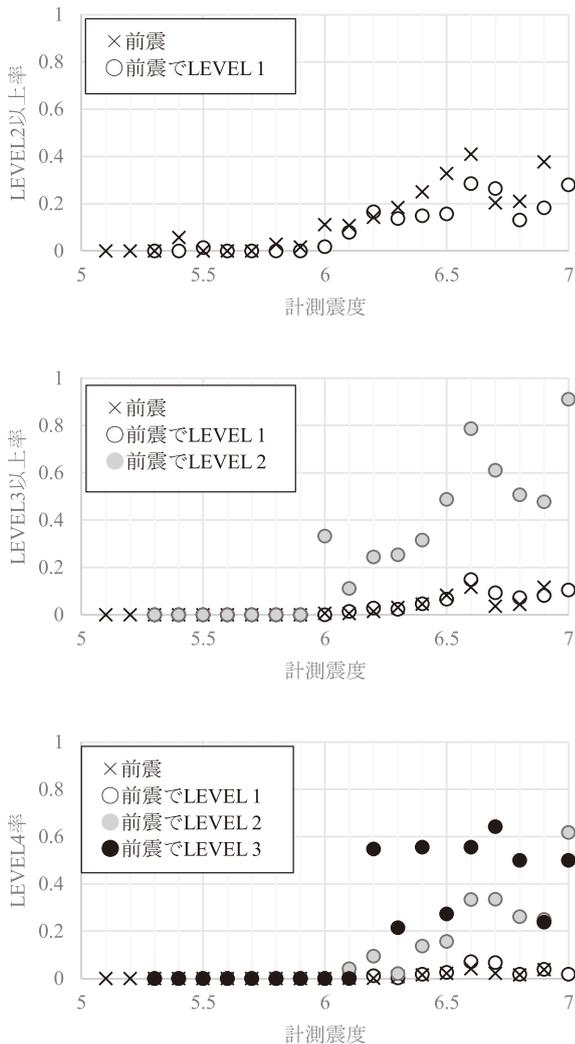


図 4.2.2-4 前震直後の判読レベルによる本震後の判読レベル率と推定計測震度の関係の違い

4.2.3 繰り返し強い揺れを受ける影響を反映した建物被害率の評価方法

(1) 評価手法の概要

4.2.2 に述べたとおり、熊本地震における益城町の被害判読データによる検討では、前震による被害棟数の重複をできる限り除いて比較しても、前震直後になんらか被害が確認できる状態 (LEVEL2 以上) に至った建物は、本震において、同程度の強さの揺れに対してより高いレベルの被害を生じる確率が上昇していた。

そこで、本開発では、現行の被害関数で評価する枠組を大きく変えることなく、この影響を考慮すべく、複数回の揺れによる被害棟数を評価する方法として、図 4.2.3-1 に示す手順による評価方法を開発

した。

同図は、内閣府 (2012) による被害関数を利用する場合を想定したもので、全半壊と全壊の 2 つの被害レベルに対して被害関数が設定されている場合に対応する。図中の $P_n()$ は n 回目の揺れのあとでの () 内の被害に対する推定被害率を表す。

この手順において、通常の被害関数による被害棟数の推定に追加する情報は、各々の揺れの直前におけるメッシュ別、被害関数区別の被害棟数である。また、図中の赤字で示す、半壊に至ったと推定された建物の全壊に対する被害関数 $f'_{全壊}(x)$ を新たに評価する必要があり、その方法は次節で述べる。

なお、以下では、被害レベルを半壊と全壊の 2 つに限って議論を展開するが、3 つ以上のレベルの被害棟数を推定する場合も基本的な考え方は同様である。また、半壊と括られている場合も被った被害の程度には幅があり、より大きな被害を被った住宅ほど、次の揺れが同程度であってもより深刻な被害に至る可能性は高い。こうした効果を反映するために、例えば、被害程度を過去に経験した最大変形に関係づけ、次の被害関数の更新の程度に反映する方法も考えられる。しかしながら、もともとの被害関数は地震動強さと被害率の関係を示すもので、最大変形を陽に評価するものではないこと、過度に複雑な評価方法は計算時間に負荷をかけることから、ここでは、過去の揺れの影響は被害の有無でまとめ、半壊が次の揺れに与える影響にばらつきを考えて、被害関数を評価することにした。

(2) 過去の揺れによる被害による劣化を考慮した被害関数の構築方法

① 評価の流れ

通常の 1 回の揺れによる被害関数 $f_{全壊}(x)$ は与えられるもの (以下、これを原被害関数と呼ぶ) として、半壊に至った建物の全壊に対する被害関数 $f'_{全壊}(x)$ は、原被害関数から相対的に劣化した関数として評価する。劣化した被害関数は、2 回の揺れを続けて入力した時刻歴応答解析を多数行い、その最大応答と限界変形角から計算した被害率と 2 回目の地震動強さとの関係として表現する。その具体的な手順は、以下のとおりである。

手順 1: 原被害関数に適合する建物モデルを同定する。

1回目の揺れ

推定地震動強さ s_1

$$P_1(\text{半壊}) = f_{\text{全半壊}}(S_1) - f_{\text{全壊}}(S_1)$$

$$P_1(\text{全壊}) = f_{\text{全壊}}(S_1)$$



2回目の揺れ

推定地震動強さ s_2

$$P_2(\text{半壊}) = \underbrace{P_1(\text{半壊}) \times (1 - f'_{\text{全壊}}(S_2))}_{\text{1回目のあと半壊}} + \underbrace{(1 - P_1(\text{半壊}) - P_1(\text{全壊})) \times (f_{\text{全半壊}}(S_2) - f_{\text{全壊}}(S_2))}_{\text{1回目のあと半壊未満}}$$

$$P_2(\text{全壊}) = P_1(\text{全壊}) + \underbrace{P_1(\text{半壊}) \times f'_{\text{全壊}}(S_2)}_{\text{1回目のあと半壊}} + \underbrace{(1 - P_1(\text{半壊}) - P_1(\text{全壊})) \times f_{\text{全壊}}(S_2)}_{\text{1回目のあと半壊未満}}$$



n回目の揺れ

推定地震動強さ s_n

$$P_n(\text{半壊}) = \underbrace{P_{n-1}(\text{半壊}) \times (1 - f'_{\text{全壊}}(S_n))}_{\text{(n-1)回目のあと半壊}} + \underbrace{(1 - P_{n-1}(\text{半壊}) - P_{n-1}(\text{全壊})) \times (f_{\text{全半壊}}(S_n) - f_{\text{全壊}}(S_n))}_{\text{(n-1)回目のあと半壊未満}}$$

$$P_n(\text{全壊}) = P_{n-1}(\text{全壊}) + \underbrace{P_{n-1}(\text{半壊}) \times f'_{\text{全壊}}(S_n)}_{\text{(n-1)回目のあと半壊}} + \underbrace{(1 - P_{n-1}(\text{半壊}) - P_{n-1}(\text{全壊})) \times f_{\text{全壊}}(S_n)}_{\text{(n-1)回目のあと半壊未満}}$$

$f_{\text{全半壊}}(\)$: 全半壊の被害関数 $f_{\text{全壊}}(\)$: 全壊の被害関数 $f'_{\text{全壊}}(\)$: 全壊の被害関数(半壊住宅用)

図 4.2.3-1 繰り返し揺れを受けた影響を考慮して被害関数により被害棟数を推定する手順の概要

手順 2: 同定したモデルが半壊に相当する最大変形に至る地震動を探索する。

手順 3: 手順 2 で定めた地震動と、被害関数の説明変数を定める地震動を連続して入力した時刻歴解析による被害率を多数計算し、これらの被害率と地震動強さの関係を回帰して、半壊に至った建物の全壊に対する被害関数を求める。

手順 1 では、地震動強さを変えた多数の強震記録を入力とした一質点系の時刻歴応答解析で最大応答を求める。各被害に至るときの応答の閾値(限界変形角)の確率モデルを設定すれば、被害率を計算できるので、被害率が原被害関数に整合するように建物モデルを定める。ここで、建物モデルとは、復元力特性のパラメタと限界変形角の確率モデルをあわせたものを指すことにする。

被害関数は、対象建物を構造種別や建築年代等の属性区分で定めるが、区分内の構造特性にはばらつきがある。そこで、手順 1 や手順 3 では、構造特性のばらつきを表現するために、復元力特性のパラメ

タのうち、降伏耐力を確率変数でモデル化した。

次に、復元力特性、入力地震動、建物モデル、半壊の設定方法について述べる。

② 復元力特性モデル

時刻歴応答解析では、木造住宅はバイリニアモデルとスリップモデルをつないだ、五十田・河合(2007)による復元力特性せん断バネをもつ一質点系でモデル化した。

繰り返し強い揺れを受ける木造住宅の地震挙動については、より詳細に劣化挙動を追跡できるモデルの提案(人見ほか, 2009)もなされている。しかし、ここでの目的は、具体的な地震動に対する詳細な挙動を再現することではなく、半壊に相当する変形を生じる揺れと、引き続きある程度の強さの揺れを作用させたときの変形を大局的に知ることであり、種々の不確定性を反映させて多数の時刻歴応答解析を実行するため、より簡便にパラメタを設定できるように、上記のモデルを採用した。

このモデルは、スリップモデルの降伏点を独立変

数とし、初期剛性などのほかのパラメタはその従属変数になっている。そこで、まずは多数の時刻歴解析を実施して、更新対象の被害関数に適合する降伏点の確率分布を「④原関数に適合するモデルの作成方法」に後述する方法で探索する。その際、降伏耐力は、五十田・河合(2007)に従い、総重量 500 kN ($5 \text{ kN/m}^2 \times 100 \text{ m}^2$ で想定) で規準化したベースシア係数で表現した。また、等価高さは同文献のとおり 5.4 m、減衰は、変形角 1/120 における割線剛性比例型とし、減衰定数は 5% とした。限界変形角は、日下ほか(2015)を参考に、半壊に対して中央値 1/50rad. 対数標準偏差 0.4、全壊に対して同じく 1/30rad. と 0.4 でモデル化した。

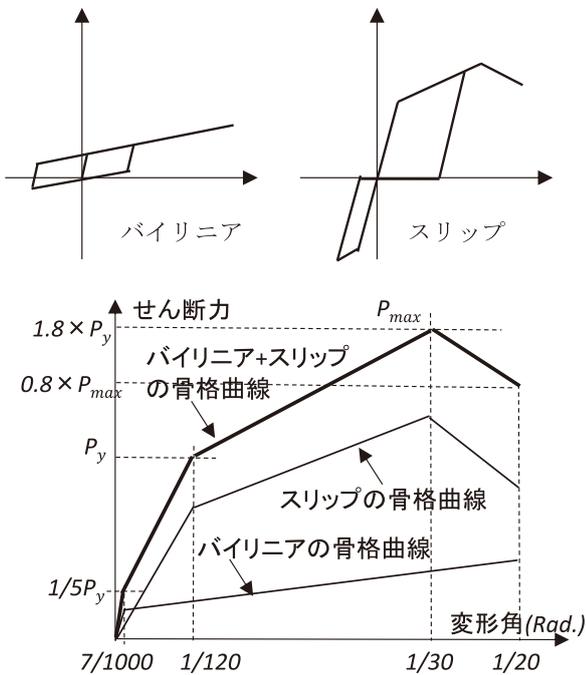


図 4.2.3-2 木造住宅の復元力特性モデル

③ 入力地震動

被害率のサンプルを生成するための地震動は、国土交通省の告示で規定される「極めて稀に発生する」地震動に対して定められたスペクトルに適合するように加速度時刻歴波形(位相を変えた3波)を作成し、その最大速度を概ね 5 cm/s または 10 cm/s 刻みで 15 cm/s から 320 cm/s になるように、係数を乗じて振幅を変えた入力地震動群を用いた。図 4.2.3-3 に原波の加速度時刻歴を示す。

④ 原関数に適合するモデルの作成方法

表 4.2.3-1 に示す値で離散化した降伏ベースシア係数をもつ復元力特性モデルを作成し、③で述べた地震波形群を入力とした時刻歴応答解析(総数 1,860 ケース: 耐力が低いモデルへの大入力やその逆のケースは省略した)を実行して最大応答変形角を求めた。限界変形角を②で述べた対数正規分布のモデルとすると、最大応答変形角が限界変形角を上回る確率として、全壊率および全半壊率のサンプルが作成できる。図 4.2.3-4 に $C_y=0.3$ のケースと $C_y=0.6$ のケースを例示する。

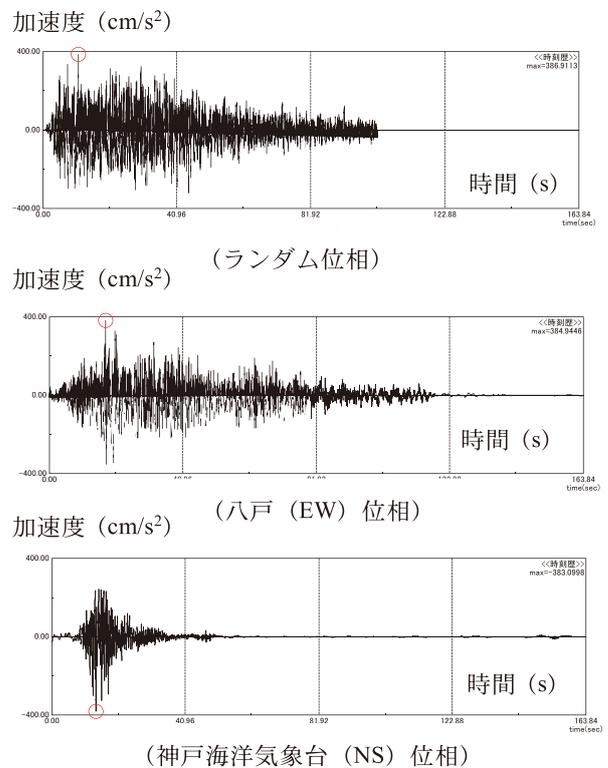


図 4.2.3-3 サンプルの生成に用いた告示スペクトルに適合させた模擬地震動加速度波形(原波)

表 4.2.3-1 設定した降伏ベースシア係数一覧

0.03	0.05	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
1.6	1.8	2.0	2.3	2.6	3.0			

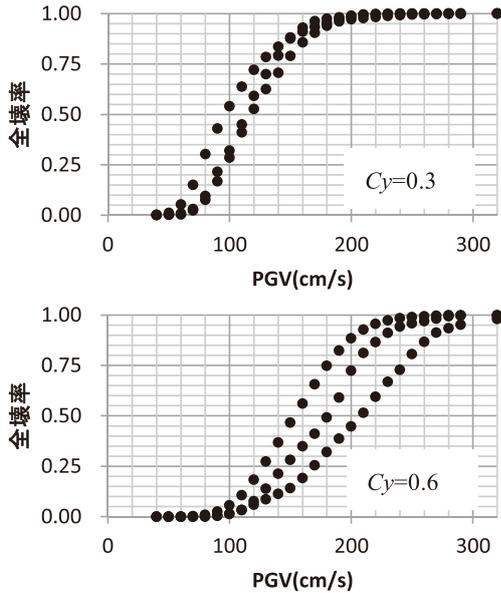


図 4.2.3-4 全壊率サンプルの生成例

次に、降伏ベースシア係数が対数標準偏差 0.4 の対数正規分布に従うと仮定して、被害率のサンプルが原被害関数に整合するように、降伏ベースシア係数の中央値 m_{c_y} を同定する。具体的には、原被害関数 $f(s_j)$ に対して、式(4.2.3-1)で計算される自乗誤差の重み付きの和 $S^2(m_{c_y})$ が最小になる中央値 \tilde{m}_{c_y} を求める。

$$S^2(m_{c_y}) = \sum_{j=1}^N \left\{ f(s_j) - p_j(c_{y_j}, s_j) \right\}^2 \cdot w_j(c_{y_j} | m_{c_y}) \quad (4.2.3-1)$$

ここで、

s_j : サンプル j ($j = 1, \dots, 1860$) に用いた入力地震動の地震動強さ指標

$p_j(\cdot)$: サンプル j の被害率、() 内は、ベースシア係数 c_{y_j} と地震動強さ指標 s_j から計算されたことを明示したもの

$w_j(c_{y_j} | m_{c_y})$: サンプル j の重み

$w_j(c_{y_j} | m_{c_y})$ は、ベースシア係数の中央値 m_{c_y} と c_{y_j} およびベースシア係数が c_{y_j} と同じ値のサンプルの総数 n_j を用いて式(4.2.3-2)で計算する。

$$w_j(c_{y_j} | m_{c_y}) = \frac{w(c_{y_j} | m_{c_y})}{n_j} \quad (4.2.3-2)$$

$w(c_{y_j} | m_{c_y})$ は、中央値 m_{c_y} 、対数標準偏差 0.4 の対数正規分布を仮定したときに、表 4.2.3-1 の隣

り合う数値の幾何平均で定めた区間(例えば、 $c_{y_j} = 0.05$ のサンプルの場合、 $\sqrt{0.05 \times 0.03} = 0.0387$ と $\sqrt{0.05 \times 0.08} = 0.0632$ の区間)に含まれる確率で、同じベースシア係数をもつサンプルに割り当てられる重みの総和である。なお、 $c_{y_j} = 0.03$ のサンプルに対しては、 0.0387 よりも小さくなる確率を、 $c_{y_j} = 3.0$ のサンプルには、 $2.792 (= \sqrt{2.6 \times 3.0})$ よりも大きくなる確率を割り当てる。

計算例として、図 4.2.3-5 に示す内閣府(2012)による木造住宅の被害関数に対して同定した中央値の一覧を表 4.2.3-2 に示す。内閣府(2012)の被害関数は説明変数に計測震度を用いているので、上記の手順において用いた入力地震動波形には藤本・翠川(2010)による式(4.2.3-3)で計測震度に相当する値 SI を与えた。

$$SI = 1.324 + 1.019 \times \log(PGA \times PGV) \quad (4.2.3-3)$$

ここで、

PGA : 最大加速度 (cm/s^2)

PGV : 最大速度 (cm/s)

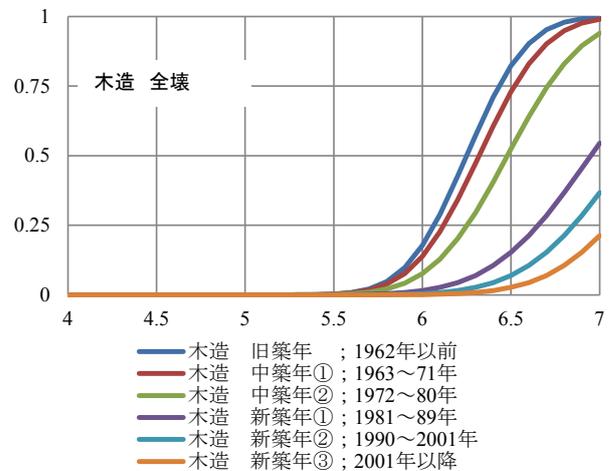


図 4.2.3-5 内閣府(2012)による木造住宅の全壊に対する被害関数

表 4.2.3-2 内閣府(2012)に整合するように求めた建物モデルの降伏ベースシア係数の中央値

	中央値
旧築年: 1962 年以前	0.13
中築年①: 1963 ~ 71 年	0.15
中築年②: 1972 ~ 80 年	0.21
新築年①: 1981 ~ 89 年	0.54
新築年②: 1990 ~ 2001 年	0.78
新築年③: 2001 年以降	1.05

⑤ 半壊に相当する最大変形に至る地震動の設定方法

半壊に至るときの限界変形角にはばらつきがあり、また半壊状態にも一部損壊に近い状態から全壊に近い状態までさまざまな状況を考え得る。そこで、(d)で述べた原関数を表現するために作成した降伏ベースシア係数と地震動の各組み合わせを候補として、半壊の生じやすさを重みとした抽選を行い、半壊のサンプルを作成した。

すなわち、(d)で作成したサンプル j ($j = 1, \dots, 1860$)について、その最大応答変形角と限界変形角の確率モデルから求めた全半壊率 $Pf_{mh,j}$ と全壊率 $Pf_{h,j}$ を用いて、半壊確率 $Pf_{m,j}$ を $Pf_{m,j} = Pf_{mh,j} - Pf_{h,j}$ で求める。次に同じ降伏ベースシア係数をもつサンプルをまとめた集団から、繰り返しを許して $Pf_{m,j}$ に比例した重み付き抽選により必要な数を抽出して、半壊状態を表現した降伏ベースシア係数と地震動の組み合わせのサンプルとする。

⑥ 半壊に至った建物の全壊率のサンプルと被害関数の作成

半壊建物の全壊率は、④に述べた方法で作成した復元力特性に最初の地震動を入力した結果を引き続いて、もう一度、時刻歴応答解析を行い求めた最大応答と、さきに設定した限界変形角モデルから求めた全壊率で求める。また、サンプルの地震動強さ(被害関数の説明変数)は、1回目の地震度によらず、2回目の地震動のものとする。

この手順では、2回目の入力による最大応答変形角が先の入力で生じた最大応答変形角を超えないサンプルが発生する。厳密に考えると、「最初の地震動入力を受けて半壊になった」サンプルとして抽出したということは、そのサンプルの全壊の限界変形角が、先の入力による最大応答よりも大きいことを仮定したことになる。したがって、2回目の入力による応答がそれを超えない場合、全壊に至らないことになり、そのサンプルの全壊率はゼロとすべきである。

しかし、この全壊率の評価方法は、「半壊であった、すなわち全壊していない」という条件によって、全壊の限界変形角の確率分布を大きい方に偏らせ、抽出したサンプルから計算される被害率が、最初に原関数に整合させた建物モデルから想定されるものよ

りも必ず低くなる。これは「破壊が最大応答だけで説明ができ、かつその限界値が繰り返し揺れを受けても変化しない」という仮定から導かれたものであるが、このことは必ずしも自明ではない。

そこで、繰り返しの影響を小さく見積もる危険性が生じないように、安全側の判断として、上記の手順で生成したサンプルのうち、2回目の入力による最大応答変形角が先の入力によるそれを下回るものは除外して、原関数への適合の際に用いた式(4.2.3-1)と類似の式(4.2.3-4)で、 $S^2(\mu)$ が最小になるように μ (平均)と σ (標準偏差)を探索した。

その際、各サンプルの重み w'_j ($c_{y,j} | m_{c_y}$)は、式(4.2.3-2)と類似の式(4.2.3-5)で表現されるが、先で述べた手順により除外されたサンプルがあるため、原被害関数への適合に用いたものとは異なる値になっているに注意が必要である。

$$S^2(\mu) = \sum_{j=1}^N \{f(s_j, \mu, \sigma) - p_j(c_{y,j}, s_j)\}^2 \cdot w'_j \quad (4.2.3-4)$$

$(c_{y,j} | m_{c_y})$

$$w'_j(c_{y,j} | m_{c_y}) = \frac{w(c_{y,j} | m_{c_y})}{n'_j} \quad (4.2.3-5)$$

ここで、

n'_j : 繰り返しの影響を評価する際に用いるサンプル群のうちベースシア係数が $c_{y,j}$ と同じ値のサンプルの総数

図4.2.3-6に内閣府(2012)による木造住宅の全壊の被害関数について、半壊住宅の全壊に対する被害関数を評価した事例を示す。図4.2.3-6では、半壊建物の各建築年代の被害関数と同色の破線で原被害関数を重ねて図示している。また、これらの被害関数のパラメタを表4.2.3-3に一覧した。図4.2.3-6、表4.2.3-3にみられるように、半壊の住宅に対する被害関数は、より低い計測震度から全壊が生じやすい被害関数が評価されている。

4.2.4 さまざまな被害関数に対する適用結果

4.2.3に述べたものと同様の方法で、さまざまな被害関数についても、半壊状態の木造住宅に対する被害関数を評価した。図4.2.4-1～図4.2.4-5にその結果を示す。また、これらの被害関数のパラメタを表4.2.4-1と表4.2.4-2に一覧にした。なお、ここで

示す被害関数は、半壊になった影響を平均(対数標準型の場合は中央値)のみ更新することで表現したものになっている点に注意されたい。

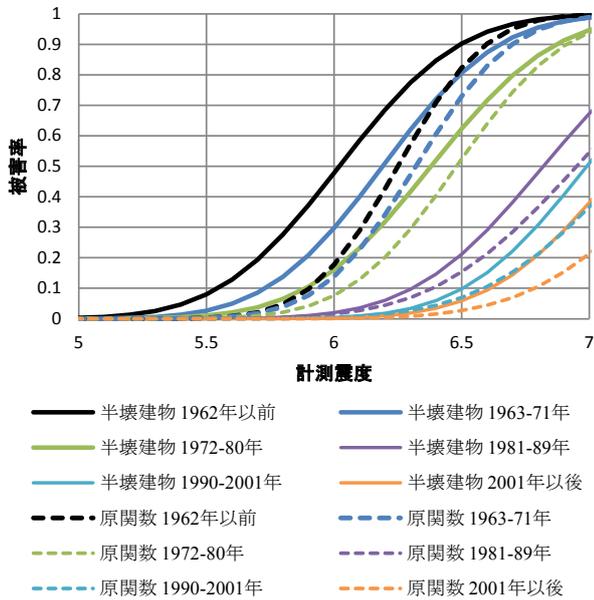


図 4.2.3-6 内閣府(2012)による半壊状態の木造住宅の全壊に対する被害関数

表 4.2.3-3 内閣府(2012)による木造住宅の全壊に対する原被害関数と半壊状態の被害関数のパラメータ一覧

	原関数		半壊建物	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
旧築年 1962年以前	6.25	0.27	6.02	0.37
中築年① 1963-71年	6.32	0.29	6.19	0.36
中築年② 1972-80年	6.48	0.34	6.38	0.38
新築年① 1981-89年	6.95	0.44	6.82	0.40
新築年② 1990-2001年	7.15	0.44	6.99	0.38
新築年③ 2001年以後	7.35	0.44	7.12	0.40

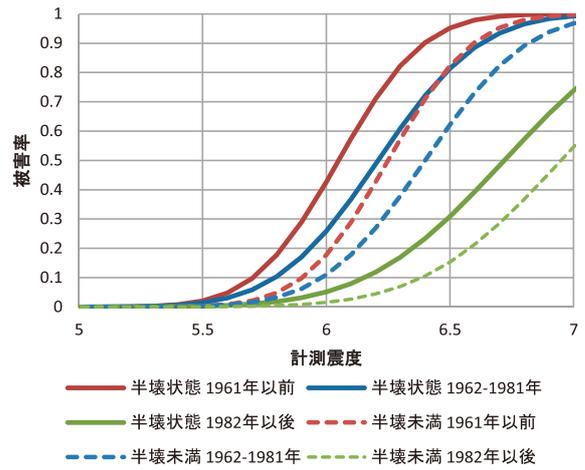


図 4.2.4-1 中央防災会議(2004)による半壊状態の木造住宅の全壊に対する被害関数

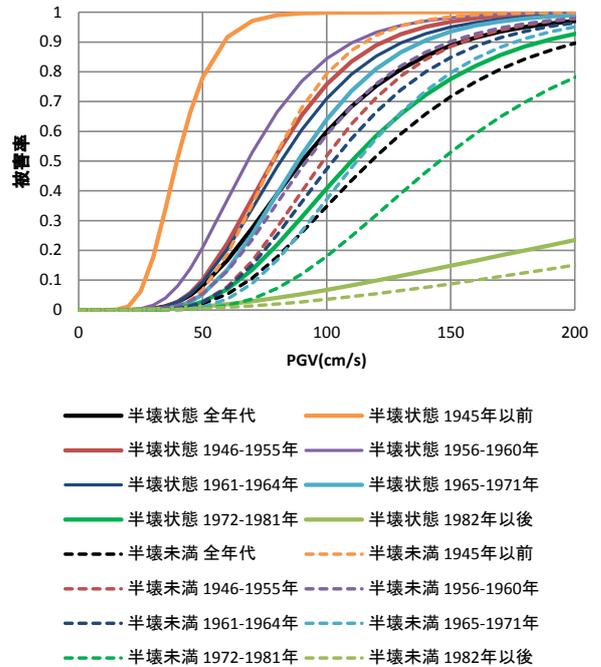


図 4.2.4-2 堀江(2004)による半壊状態の木造住宅の全壊に対する被害関数

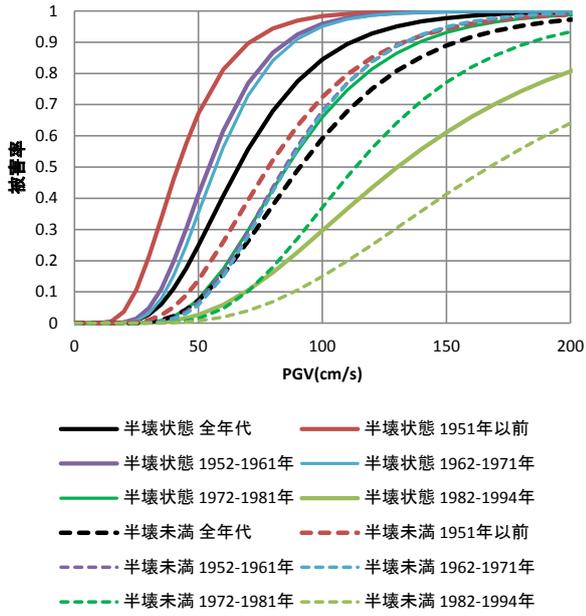


図 4.2.4-3 村尾・山崎(2000)による半壊状態の木造住宅の全壊に対する被害関数

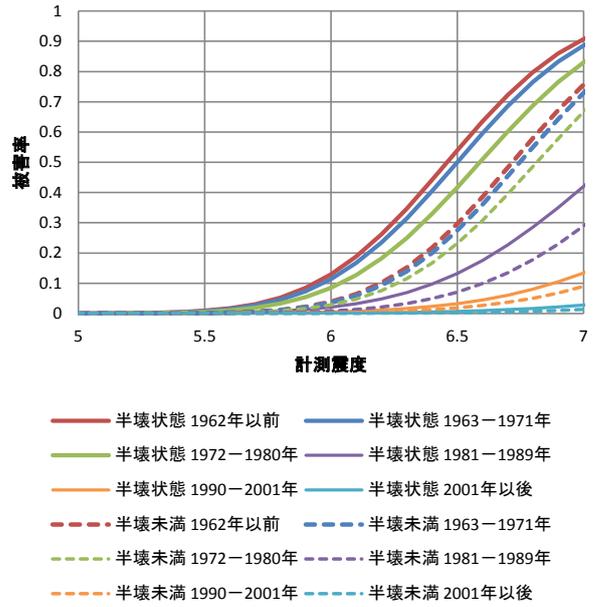


図 4.2.4-5 防災科研(2015)による半壊状態の木造住宅の全壊に対する被害関数

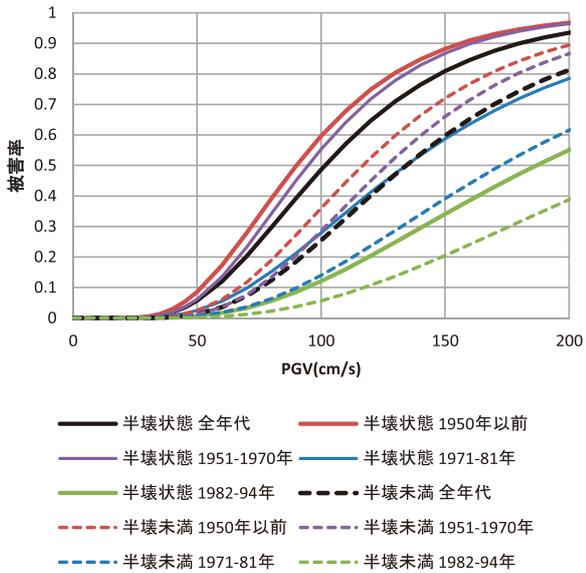


図 4.2.4-4 村尾・山崎(2002)による半壊状態の木造住宅の全壊に対する被害関数

表 4.2.4-1 半壊状態の木造住宅の全壊に対する被害関数のパラメータ一覧(正規分布型)

被害関数の種類	建築年代等	パラメータ	
		平均	標準偏差
中央防災会議 (2004)	1961 年以前	6.05	0.270
	1962-1981 年	6.21	0.325
	1982 年以後	6.72	0.440
防災科研 (2015)	1962 以前	6.46	0.407
	1963 ~ 1971 年	6.5	0.414
	1972 ~ 1980 年	6.59	0.429
	1981 ~ 1989 年	7.11	0.546
	1990 ~ 2001 年	7.75	0.678
	2001 年以降	8.76	0.921

表 4.2.4-2 半壊状態の木造住宅の全壊に対する被害関数のパラメータ一覧(対数正規分布型)

被害関数の種類	建築年代等	パラメータ	
		対数平均	対数標準偏差
堀江 (2004)	全体	4.50	0.420
	1945 年以前	3.68	0.300
	1946-1955 年	4.36	0.350
	1956-1960 年	4.22	0.380
	1961-1964 年	4.40	0.370
	1965-1971 年	4.48	0.350
	1972-1981 年	4.70	0.410
	1982 年以後	5.95	0.900
村尾・山崎 (2000)	全年代	4.19	0.410
	1951 年以前	3.73	0.411
	1952-1961 年	3.99	0.353
	1962-1971 年	4.04	0.342
	1972-1981 年	4.45	0.378
村尾・山崎 (2002)	1982-1994 年	4.87	0.496
	全年代	4.62	0.447
	1950 年以前	4.50	0.430
	1951-1970 年	4.55	0.413
	1971-1981 年	4.90	0.504
	1982-1994 年	5.23	0.534

4.2.5 まとめ

本節では、被害関数を用いて、余震等を考慮した繰り返し強い揺れを受けたときの影響を適切に考慮して被害棟数を推定できる建物の被害棟数の推定手法を開発した。

開発にあたり、熊本地震における益城町の前震と本震のそれぞれ直後の空中写真の判読データを整理し、繰り返し強い揺れを受けた影響を分析した。この分析結果に基づき、半壊状態に至った木造住宅の全壊に対する被害関数を更新することで、繰り返しの影響を考慮する被害推定方法を策定した。

被害関数の更新にあたっては、木造住宅の復元力

特性を、繰り返し揺れを受けることで劣化を表現できるバイリニアとスリップモデルを並列にしたモデルで表現し、2回の揺れを連続して入力した多数の時刻歴応答解析結果を利用した。

参考文献

藤本一雄・翠川三郎 (2005) : 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集, No.7, pp.241-246.

藤本一雄・翠川三郎 (2006) : 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度との関係, 日本地震工学会論文集, Vol.6, pp.11-22.

藤本一雄・翠川三郎 (2010) : マグニチュードの影響を考慮した計測震度と地震動強さ指標の関係, 日本地震工学会論文集, 第 10 巻, 第 2 号, pp.1-11.

橋本靖宏・五十田博・荒木康弘・汐満将史・境有紀・松田昌洋・金子洋文 (2016) : 構造用合板を耐力壁とする木造住宅の地震後の残余性能 - 木造住宅の地震時挙動に関する研究 その 6-, 日本建築学会構造系論文集, No.728, pp.1683-1690.

人見祐策・五十田博・河合直人 (2009) : 大変形と繰り返しによる劣化を考慮した木造壁の復元力特性モデル - 木造建物の地震時挙動に関する研究 その 2-, 日本建築学会構造系論文集, No.666, 2009, pp.2299-2306.

五十田博・河合直人 (2007) : 木造軸組構法住宅に用いる壁の復元力特性モデル: 木造建物の地震時挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.616, pp.157-163.

日下彰宏・石田寛・鳥澤一晃・土井央・山田和樹 (2015) : 地震保険実績データを用いた地震動特性を考慮した木造住宅の被害関数, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.48, pp.527-532.

門馬直一・藤原広行・中村洋光・佐伯琢磨・下村博之・山田哲也・藤澤誠二 (2016) : 平成 28 年熊本地震における益城町の震度分布と建物被害の関係, 日本地震工学会・大会—2016 梗概集.

内閣府 (2012) : 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ第一次報告.

内藤昌平・門馬直一・中村洋光・藤原広行・下村博之・山田哲也 (2018) : 航空写真目視判読にもとづく 2016 年熊本地震による建物被害調査, 土木学

会論文集 A1 特集号 Vol.74 No.4, 地震工学論文集 第37巻.

中村洋光・功刀卓・高橋郁夫・藤原広行・青井真・青柳京一・橋本光史・日下彰宏・本間芳則(2015):リアルタイム地震被害推定・状況把握システムの開発状況, 日本地震工学会第11回年次大会梗概集, pp.4-32.

岡田成幸・高井伸雄(1999):地震被害調査のための建物分類と破壊パターン, 日本建築学会構造系論文集, No.524, pp.65-72.

更谷安紀子・長谷部裕・水谷友紀・林康裕(2010):耐久性や劣化状況を考慮した木造住宅の地震リスク評価, 日本建築学会構造系論文集, No.655, pp.1609-1615.

若松加寿江・松岡昌志(2008):地形・地盤分類250mメッシュマップ全国版の構築, 日本地震工学会大会-2008梗概集, pp.222-223.

4.3 人的被害推定手法の開発

人的被害推定手法の開発は, 既往の被害想定等の手法を踏まえ, 即時被害予測を目的とした改良を行った. なお, 地震による人的被害は様々な要因によって発生する. 例えば南海トラフ地震の被害想定(中央防災会議, 2012)では表4.3-1に示した6つの被害項目を推定している. 本研究ではこれらの人的被害項目のうち, 建物内で発生し, かつ地震動を直接の原因とする被害として建物倒壊による被害と屋内収容物の移動等による被害を対象とした.

表 4.3-1 南海トラフ地震の被害想定で考慮されている人的被害項目(中央防災会議, 2012)

人的被害項目
建物倒壊による被害
津波による被害
急傾斜地崩壊による被害
火災による被害
ブロック塀・自動販売機等の転倒, 屋外落下物による被害
屋内収容物移動・転倒, 屋内落下異物による被害

4.3.1 人的被害推定手法に関する既往研究

地震による人的被害推定は国や自治体による被害推定や学術論文で数多く実施されてきた. ここでは表4.3.1-1に示した手法を対象に, 人的被害推定手法を概観する. このうち, 東京都(1997)と中央防災会議(2012)は, 将来発生する可能性のある地震を対象とした被害想定である. 福島ほか(1997)および佐伯ほか(2001)は, いずれも阪神・淡路大震災の町丁目単位での被害データに基づいて人的被害推定手法を検討したものである. 岡田・中嶋(2015)は建物被害のうち, 内部空間が失われるような, 深刻な建物被害に注目した被害推定手法である.

表 4.3.1-1 レビューの対象とする人的被害推定手法

文献名	概要
東京都(1997)	直下型地震の被害想定
中央防災会議(2012)	南海トラフ地震の被害想定
福島ほか(1997)	阪神・淡路大震災の町丁目単位での建物・人的被害に基づく分析
佐伯ほか(2001)	阪神・淡路大震災の町丁目単位での建物・人的被害に基づく分析
岡田・中嶋(2015)	建物の構造的被害(内部空間損失)に注目した手法

東京都(1997)は阪神・淡路大震災(兵庫県南部地震)の被害から全壊率と死者率の関係を一次式で示した経験式で建物被害から人的被害を推定する手法で、具体的には下記の式である。

$$D_w = 0.0315 \times H_w \quad (4.3.1-1)$$

$$D_n = 0.0078 \times H_n \quad (4.3.1-2)$$

ここで、 D_w ：木造建物死者率[%]、 H_w ：木造全壊率[%]、 D_n ：非木造建物死者率[%]、 H_n ：非木造全壊率[%]。

中央防災会議(2012)は南海トラフ地震の被害想定を行ったものであるとともに、これ以降に行われた都道府県等による被害想定にも用いられている手法である。この手法は、2000年以降に発生した主な地震の建物被害と人的被害から構築されたもので、具体的には下式により求める。

$$C_w = 0.0676 \times H_w \times R_w \quad (4.3.1-3)$$

$$C_n = t_n \times H_n \times R_n \quad (4.3.1-4)$$

$$t_n = 0.00840 \times \frac{P_{n0}}{B_n} \left(\frac{P_n}{B_n} \right) \div \frac{P_{w0}}{B_w} \left(\frac{P_w}{B_w} \right) \quad (4.3.1-5)$$

ここで、 C_w ：木造建物死者数[人]、 H_w ：木造全壊棟数[棟]、 C_n ：非木造建物死者数[人]、 H_n ：非木造全壊棟数[棟]、 t_n ：係数、 P_{w0} ：夜間人口(木造)、 P_{n0} ：夜間人口(非木造)、 B_w ：木造棟数[棟]、 B_n ：非木造棟数[棟]。

福島ほか(1997)は阪神・淡路大震災を対象として、死亡場所が特定出来た857例に基づく町丁目別の死亡率と、建築研究所による建物被害調査結果による町丁目別の建物全壊率に基づいて下記の予測式を作成している。

$$D = 0.0006 \times H^2 + 0.0067 \times H + 0.0054 \quad (4.3.1-6)$$

ここで、 D_w ：木造建物死者率[%]、 H_w ：木造全壊率[%]。

佐伯ほか(2001)は阪神・淡路大震災の市町村単位での人的被害および建物被害に基づいて作成した回帰式(表4.3.1-2)により、死者等の人的被害を推定する手法である。また、人的被害および建物被害程度と回帰係数との関係について、震災特別委員会による「全壊・大破率」は「死亡率」や「死亡+入院率」といった重大な人的被害を示すのに適している一方で、自治体罹災証明による「死亡+重軽傷率」のような軽微な負傷までを含む場合には「全半壊率」の方が、相関係数が高いことを示している。

表 4.3.1-2 建物被害(X)と人的被害(Y)の回帰式(佐伯ほか, 2001)

建物被害 x		人的被害 y	死亡率	死亡+入院率	死亡+重傷率	死亡+重軽傷率
震災特別委員会低層建物全壊・大破率(N=13)			$y=0.0223x$ (R=0.939)	$y=0.0305x$ (R=0.946)	$y=0.0495x$ (R=0.918)	$y=0.0950x$ (R=0.304)
自治体罹災証明(N=42)	全壊率		$y=0.0155x$ (R=0.903)	$y=0.0207x$ (R=0.886)	$y=0.0342x$ (R=0.875)	$y=0.0900x$ (R=0.700)
	全半壊率		$y=0.0070x$ (R=0.798)	$y=0.0094x$ (R=0.789)	$y=0.0158x$ (R=0.789)	$y=0.0464x$ (R=0.753)

・Nは対象としている市区町村数、Rは相関係数

岡田・中嶋(2015)による手法は、D-Level(高井・岡田, 2001)による建物被害を基に外傷重傷度スコア(ISS: Injury Severity Score)の確率を推定し、ISS値別の死亡率データ(日本救急医学会・日本外傷学会, 2018; 以下、外傷データバンクと称す)に基づいて死者数を推定する手法である。D-Levelは人的被害発生の観点から、全壊以上の被害を特に細分化した被害区分(中嶋・岡田, 2008)で、建物被害をD0~D6の7段階に区分したもので、D4以上が全壊に相当する。

ISS値は身体の6部位(頭頸部・顔面・胸部・腹部および骨盤内臓器・四肢および骨盤・体表)別に求められたAIS(Abbreviated Injury Scale)の大きいもの3部位の二乗和から求められる値である(日本外傷学会, 2017)。AISは診療録等の記載から表4.3.1-3の1~6で評価するものである。なお、AISに1カ所でも6がある場合のISSは75とすることになっている。従ってISSは0から75(=5²×3)の範囲の値を取る。

表 4.3.1-3 AISコードおよび重症度(日本外傷学会, 2017)

コード	重傷度
1	軽症(Minor)
2	中等症(Moderate)
3	重症(Serious)
4	重篤(Severe)
5	瀕死(Critical)
6	救命不能(Maximum)

岡田・中嶋(2015)では、D-LevelからISS値の発生確率を、対数正規分布の確率密度関数により下記により求めている。ここで、対数正規分布のパラメータ(表4.3.1-4)は事前分布を基に、阪神・淡路大震災

における東灘区のISSと建物被害(D-Level)を用いたベイズ更新により得た値である。また、式(4.3.1-8)においてISS値を75で除しているのは、定義域[0,1]の確率密度で表すためである。

$$f_x(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\theta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(\theta)-\lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad (4.3.1-7)$$

$$\theta = ISS / 75 \quad (4.3.1-8)$$

表 4.3.1-4 D-Level別のISS値確率密度関数のパラメータ(岡田・中嶋, 2015)

	D4	D5	D6
λ	-3.05	-2.40	-2.27
ξ	0.38	0.21	0.39

ここで、対数正規分布の定義域は[0, ∞]であるのに対して、θの値が有界[0,1]であることと整合しないため、岡田・中嶋(2015)では基準化係数を導入して1<θの場合に値を飽和させている。一方、本研究では、結果への影響が小さいことと計算の簡略化のために基準化係数を設定せずにISSカテゴリ毎の発生確率をD-Level別(D4以上)について求め、その結果を表4.3.1-5に示した。以下、本研究ではこの値を用いることとする。

また、死者数はD-Level別の建物内滞留人口と上記により求めたISS値カテゴリ発生確率と、外傷データベースによるISSカテゴリ別の死亡率(図4.3.1-1)に基づいて算出するものである。

表 4.3.1-5 D-Level別ISS値カテゴリ発生確率

ISS値	D-Level別確率	D-Level別確率		
		D4	D5	D6
~8	軽症・中等症	9.84E-01	7.80E-01	5.33E-01
9~15	重症	1.62E-02	2.20E-01	4.22E-01
16~24	重篤	7.48E-05	8.34E-05	4.33E-02
25~40	瀕死	2.48E-07	9.70E-10	1.86E-03
41~75	死亡相当	9.32E-11	0.00E+00	1.28E-05
	計	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00

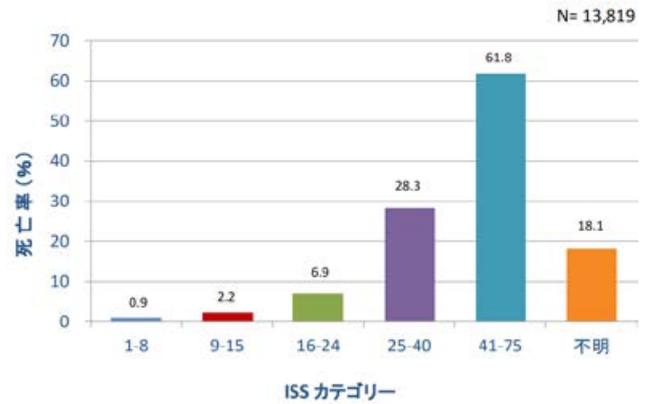


図 4.3.1-1 外傷データベースによるISSカテゴリ別の死亡率(2016年版による)

これまでに概観した既往の人的被害推定手法は、全て建物被害を求めた上で人的被害を推定するという大きな流れは共通している。一方で、建物被害から人的被害を推定する方法は、それぞれの手法によって異なっている。東京都(1997)、中央防災会議(2012)は建物全壊被害から一次式を基本とする関数により人的被害を推定している。福島ほか(1997)は建物全壊被害から二次式で人的被害を推定している。

また、着目する建物被害程度についても、文献によって若干の差異がある。多くの文献で全壊被害を用いているものの、岡田・中嶋(2015)では建物内部空間の損傷に着目して、全壊を更に細分化したD-Levelを用いた被害推定を行っている。佐伯ほか(2001)では死亡や入院と行った重篤な人的被害は全壊と相関が強い一方で、軽傷まで含めた人的被害は全半壊と相関が強いことを示している。

本研究は、適切な初動体制の確立や災害対応の意思決定を支援するための、即時性のある被害状況の推定・把握を目的として行うものである。従って、人的被害の中でも救命のためには直ちに処置が必要な負傷者数を適切に把握することが重要である。

上記を踏まえて、ISS値という定量的な受傷レベルでの人的被害算出が可能である岡田・中嶋(2015)の手法を基に、適切な人的被害区分での出力が可能な人的被害推定手法を開発することが望ましいと考えられる。

4.3.2 人的被害推定手法開発の基本的考え方

(1) 対象とする人的被害程度の定義

まず、推定の対象とする人的被害区分の定義について、表 4.3.2-1 に示す人的被害区分について概観した上で述べる。

表 4.3.2-1 主な人的被害程度区分の種類と概要

種別	概要
報道等の区分	新聞報道等で用いられている区分
被害認定基準(内閣府)	自治体等による災害に関する統計等に用いられている区分で、内閣府の被害認定基準に定義されている
消防庁による定義	消防庁による統計「救急救助の現況」で使用されている定義。
重症度・緊急度判断基準	救急医療現場などで用いられている区分で入院の要否や生命の危険の有無によって分類されている。
トリアージによる区分	災害発生時に多数の傷病者に対して最善の治療を施すために、緊急度と重症度により治療優先度を定めるもの。
医療レベル低下に着目した考え方	日常レベルの医療であれば救命出来たかどうかの視点で死者などの重篤な人的被害を区分したもの。

新聞等の報道による人的被害区分は、毎日新聞(2011)による解説記事によると、重体(重態)・重症・重傷・軽傷の4区分(表 4.3.2-2)が用いられている。最も深刻度の高い人的被害は「重体(重態)」で、外傷・病気にかかわらず症状が重く生命の危険にさらされている状態を示している。外傷による人的被害のうち重体以外は重傷と軽傷に分けられ、それぞれ全治1カ月以上と全治1カ月未満とされている。一方で重症は外傷ではなく、病気の程度が重い状態であるとされている。

表 4.3.2-2 報道等による定義(毎日新聞, 2011 より作成)

被害種類	定義(概要)
重体(重態)	怪我・病気にかかわらず症状が重く生命の危険にさらされている状態。
重症	病気の程度が重い状態。
重傷	全治1カ月以上の怪我。
軽傷	全治1カ月未満の怪我。

内閣府(2001)による被害認定基準(以下、「被害認定基準」と称す)では死者・行方不明者・重傷者・軽傷者の4つの人的被害区分が用いられている(表 4.3.2-3)。このうち負傷者は重傷者と軽傷者に分けられ、それぞれ全治1カ月以上と全治1カ月未満とされている。一方で、死者・行方不明者は死亡もしくは所在不明者を示している。

表 4.3.2-3 内閣府被害認定基準による定義

被害種類	定義(概要)
死者	当該災害が原因で死亡し、死体を確認したもの。または死体を確認することが出来ないが死亡したことが確実なもの。
行方不明者	当該災害が原因で所在不明となり、かつ死亡の疑いのあるもの。
重傷者	災害のため負傷し、医師の治療を受けまたは受ける必要のあるもののうち、1月以上の治療を要する見込みの者。
軽傷者	災害のため負傷し、医師の治療を受けまたは受ける必要のあるもののうち、1月未満で治療できる見込みの者。

消防庁では死亡、重症、中等症、軽症の4つの人的被害区分が用いられている(表 4.3.2-4)。負傷者等は入院の要否および入院期間により分類されており、重症は3週間以上の入院を要するもの、中等症は3週間未満の入院を要するもの、軽症は入院を要しないものとされている。

表 4.3.2-4 消防庁による定義(消防庁, 2017)

被害種類	定義(概要)
死亡	初診時死亡が確認されたもの。
重症	傷病程度が3週間以上の入院加療を必要とするものをいう。
中等症	傷病程度が重症または軽症以外のもの。
軽症	入院加療を要しないもの。

救急振興財団(2004)による傷病者重症度分類表は、医学的水準の飛躍的向上に伴って、傷病によっては重い症状であっても入院加療は短期間で済む場合など、前述の消防庁による定義(表 4.3.2-4)が時代にそぐわないとの議論を受けて提言されたものである。ここで「重症度とは、患者の生命予後又は機能予後を示す概念、緊急度とはその重症度を時間的に規定した概念」とし、人的被害程度を、深刻な方から死亡・重篤・重症・中等症・軽症の5分類としている(表 4.3.2-5)。ここで、軽症と中等症は入院の要否で区分され、中等症と重症は生命の危険の有無で区分され、重症と重篤は生命の危険が切迫しているか否かで区分されている。

表 4.3.2-5 傷病者重症度分類表による定義

被害種類	定義(概要)
死亡	初診時死亡が確認されたもの。
重篤	生命の危険が切迫しているもの。具体的には心肺停止もしくはそのおそれがあるもの、心肺蘇生を行ったもの。
重症	生命の危険の可能性のあるもの(死亡・重篤を除く)。
中等症	生命の危険はないが入院を要するもの。
軽症	入院を要しないもの。

トリアージは、多数の負傷者等を緊急度・重症度に応じ優先順位を決定するもの(厚生労働省, 2014)で、優先順位は表 4.3.2-6 に示した4区分で判定される。最も優先度が高いのが最優先治療群で、窒息や多量の出血などにより、直ちに救命処置を必要とするもので、現場では識別のために赤色のタグが付される。次に優先度が高いのが非緊急治療群で、バイタルサインが安定しているなど、多少治療が遅れても生命には危険がない者で、タグの色は黄色である。軽処置群は上記以外の軽易な傷病でタグの色は緑色である。死亡群・無呼吸群は既に気道を確保しても呼吸がないものや、既に死亡しているなど、心肺蘇生等の処置を施しても蘇生の可能性がないものとされ、タグの色は黒色である。

表 4.3.2-6 トリアージによる区分(東京都(2013)より抜粋)

被害種類	識別色	定義(概要)
最優先治療群 (重症群)	赤色	生命を救うため、ただちに処置を必要とするもの。窒息、多量の出血、ショックの危険のあるもの。
非緊急治療群 (中等症群)	黄色	多少治療の時間が遅れても生命には危険がない者。基本的には、バイタルサインが安定している者。
軽処置群 (軽傷群)	緑色	上記以外の軽易な傷病で、ほとんど専門医の治療を必要としないものなど。
死亡群・ 無呼吸群	黒色	気道を確保しても呼吸がないもの(無呼吸群)。既に死亡しているもの、又は明らかに即死状態であり、心肺蘇生を施しても蘇生の可能性のないもの(死亡群)。

医療の関与による救命や、災害時と平時の医療体制の差に注目した考え方として Prevented deaths・Preventable deaths(和藤・大西, 2001)がある。これは、日常の救助・医療体制であれば救命の可能性のあった死亡を Preventable Deaths と定義するとともに、医療・救助活動の介入の結果として救命できた命を Prevented Deaths と定義している。また、平

時の医療体制であっても救命できなかった命を Not preventable deaths としている。

本研究の目的が、適切な初動体制の確立や災害対応を支援するための、即時性のある被害状況の推定・把握であることを踏まえると、第一に人命救助に役立つことが求められる。そのため、人的被害区分のうち生命の危険が切迫し、救命のためには直ちに処置を行う必要のある人数を推定する事が重要であると考えられる。これに相当する人的被害の定義としては、トリアージによる「最優先治療群」や傷病者重症度分類表による「重篤」が該当すると考えられる。また、和藤・大西(2001)の考え方による医療の介入の結果として助けられる Preventable deaths や、生命の危険という点において報道で用いられている重体にも類似性がある。そのため、生命維持のためには直ちに処置を施す必要がある人的被害区分として「重体」の区分で人的被害を出力する事とする。

一方で、災害の被害情報は内閣府(2001)に基づいて死者、重傷者、軽傷者の区分で出力されている。そのため、発生した災害の大小を過去の災害と比較する場合には重傷者・軽傷者の人数が出力されることが望ましいと考えられる。また、被害推定用パラメータの調整などでは実被害データとの比較が必要となるため、実被害データとの対比が可能である重傷者・軽傷者の区分が重要である。

以上の検討を踏まえて、本研究では表 4.3.2-7 に示すように、死亡・重体・重傷・軽傷の4区分の人的被害を推定する手法を開発する。また、重体は重傷の内数として出力する。

表 4.3.2-7 本研究で定義する人的被害区分

区分	定義	出典
死亡	既に死亡しているもの。	
重体	生命の危険が切迫しているもの。	トリアージの「赤」に相当
重傷	治療に1ヶ月以上を要する見込みのもの。	内閣府(2001)
軽傷	1カ月未満で治療出来る見込みのもの。	内閣府(2001)

(2) 人的被害推定手法開発の方法

本研究では、「4.3.1 人的被害推定手法に関する既往研究」での検討結果を踏まえて、建物内部空間の損失を伴う全壊以上の被害に注目した、岡田・中嶋

(2015)によるISS値を用いた手法を基に、表4.3.2-7に示した人的被害区分での被害を出力する手法を開発した。岡田・中嶋(2015)はISSカテゴリ別人的被害から、外傷データバンクによるISSカテゴリ別死亡率を用いて死者を算出している。一方で、死者以外の生存者の人的被害区分については明示されていない。そこで、本研究では、過去に発生した被害地震の建物被害と人的被害から、岡田・中嶋(2015)の方法により建物被害から推定したISSカテゴリ別人数と、被害報等による実被害を基に、人的被害の変換パラメータを作成した。その上で、上記で作成した人的被害の変換パラメータを用いて人的被害の推定を行って、その推定精度および課題について検討した。

4.3.3 過去の被害地震における被害情報の収集整理

(1) 対象とする地震

本研究では概ね20年以内に発生した地震のうち、表4.3.3-1に示す5地震を対象として、人的被害変換パラメータの推定および人的被害の試算のための建物被害および人的被害を収集・整理した。

表4.3.3-1 被害を収集した地震

名称	Mj	死者 [人]	対象範囲
2004年新潟県中越地震	6.8	68	長岡市・小千谷市
2007年新潟県中越沖地震	6.8	15	柏崎市
2008年岩手・宮城内陸地震	7.2	23	栗原市
2016年熊本地震(前震)	6.5	9	益城町
2016年熊本地震(本震)	7.3	247	熊本市・益城町ほか

(2) 被害データの収集方法

① 建物被害の収集方法

本研究で用いる岡田・中嶋(2015)による手法は、全壊以上に該当する、D-LevelがD4・D5・D6別の建物内滞留者数を基に人的被害を推定する手法である。一方で、建物被害データの多くは罹災証明を基としているため、全壊以上の被害区分がなされていない。

そのため、本研究では面的に推定した地震動分布と全壊以上の被害を推定する被害関数を用いて、全壊以上のD-Level別建物棟数を推定した。具体的な方法は、建物構造別に後述したとおりである。

木造建物のD-Level別建物被害棟数は、中嶋・岡

田(2008)による損傷度関数と耐震評点分布を用いる下記の手順により推定した。

- 1) 全壊木造建物が存在する250mメッシュの計測震度を空間補間により推定し、取得する。
- 2) 1)で取得した計測震度に対応する損傷度0.6・0.8・0.9(それぞれD4・D5・D6に対応)の必要耐震評点を岡田・中嶋(2008)の損傷度関数(図4.3.3-1)より取得する。
- 3) 全壊建物が該当する建築年代の耐震評点分布の確率密度関数を、損傷度関数から得られる必要耐力(耐震評点)の区間で積分して全壊建物がD4・D5・D6となる確率(図4.3.3-2)を求める。
- 4) 市町村内の全壊建物を対象に1～3を繰り返してD4・D5・D6となる確率を集計して、それぞれの被害となる期待値を推定する。

なお、一部の地震・市町村では、防災科学技術研究所により層破壊が発生した建物の情報が収集されている。これら層破壊が発生した建物については、D5もしくはD6の被害が発生したものとして、上記の手法を準用して層破壊建物のD5・D6被害発生期待値を推定した。

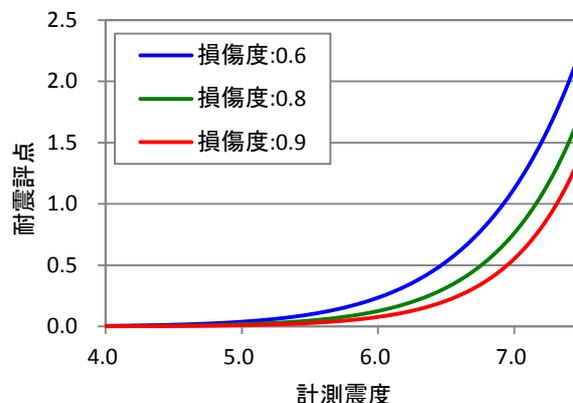


図4.3.3-1 中嶋・岡田(2008)による損傷度関数

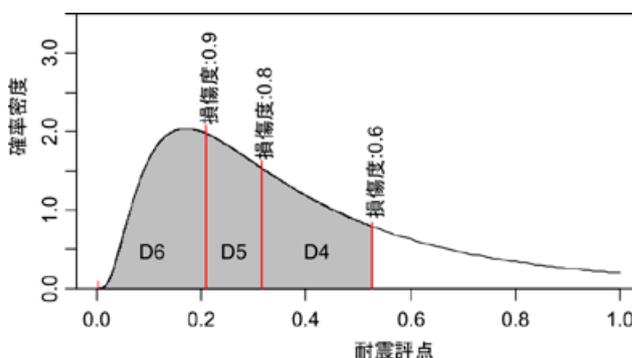


図4.3.3-2 D-Level別建物被害発生確率推定の例(計測震度6.5, 1950年以前の木造建物)

非木造建物のD-Level別被害棟数は、岡田・高井(2001)によるDamage Grade別の被害関数(図4.3.3-3)を用いて推定した。推定は、全壊木造建物が存在する250mメッシュで推定した震度を用いてGrade4とGrade5それぞれの確率を推定した。Grade4はD4に、Grade5はD5もしくはD6に相当するため、Grade5をD5とD5に分ける必要があるため、ここではGrade5となった建物はD5とD6で折半した。本研究で被害収集の対象とした地震における非木造建物の全壊以上の被害は少数であるため、上記によるD5とD6への分配方法で問題ないと判断した。

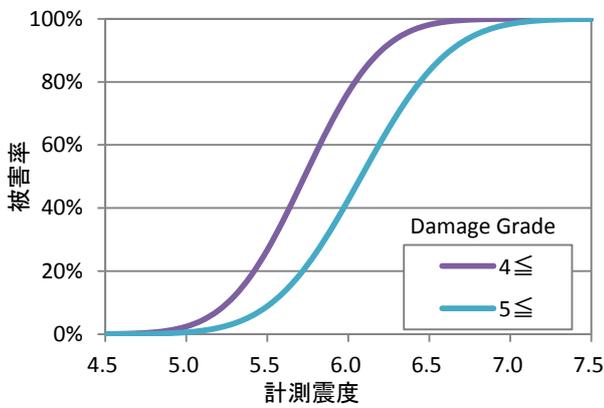


図 4.3.3-3 非木造建物の被害関数(岡田・高井, 2001)

建物被害推定に必要となる250mメッシュ単位での推定震度分布は防災科学技術研究所(K-NET, KiK-net), 気象庁および自治体による地震観測記録を基に、工学的基盤において空間補間する方法で推定した(図4.3.3-4)。

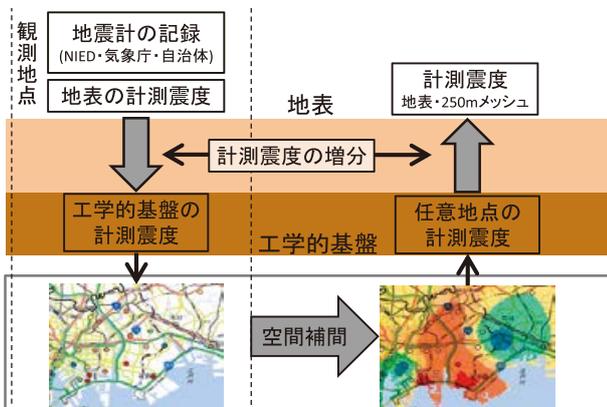


図 4.3.3-4 面的な地震動推定手法の概要

② 人的被害の収集方法

人的被害は消防庁や都道府県が発表した被害情報による死者・重傷者・軽傷者数を基に収集した。この際に、本研究で対象とする地震動を直接の原因とする建物内での人的被害以外の人的被害は除いた。具体的には、人的被害は、地震に誘発された土砂災害や、いわゆる災害関連死による死者数を主に除外している。

また、本研究では生命の危険が切迫している「重体」を被害算出項目としているが、上記の被害情報等には重体の人数は公表されていない。このため、重体に相当する人的被害の人数を特定出来ない場合には、災害時に行われたトリアージの結果を参照して、重傷者数がトリアージの最優先治療群(赤)と非緊急治療群(黄)のいずれかに該当すると仮定したうえで、両者の割合を用いて最優先治療群に相当する人数を重体者数として推定した。

(3) 建物被害および人的被害の収集結果

① 新潟県中越地震

新潟県中越地震の建物被害は、下村ほか(2016)による新潟県長岡市(旧長岡市・旧川口町)および小千谷市の個別建物被害データを基に作成した。このうち、小千谷市の全壊建物は防災科学技術研究所が層破壊建物の情報を取得しているため、層破壊建物はD5・D6、層破壊に該当しない全壊建物はD4に相当するものとした。上記による全壊以上の建物分布を図4.3.3-5に示した。この建物被害データを基に、空間補間により推定した250mメッシュ単位での震度分布(図4.3.3-6)と「4.3.2(2)①建物被害の収集方法」によりD-Level別建物被害を推定し、その結果を表4.3.3-2に示した。

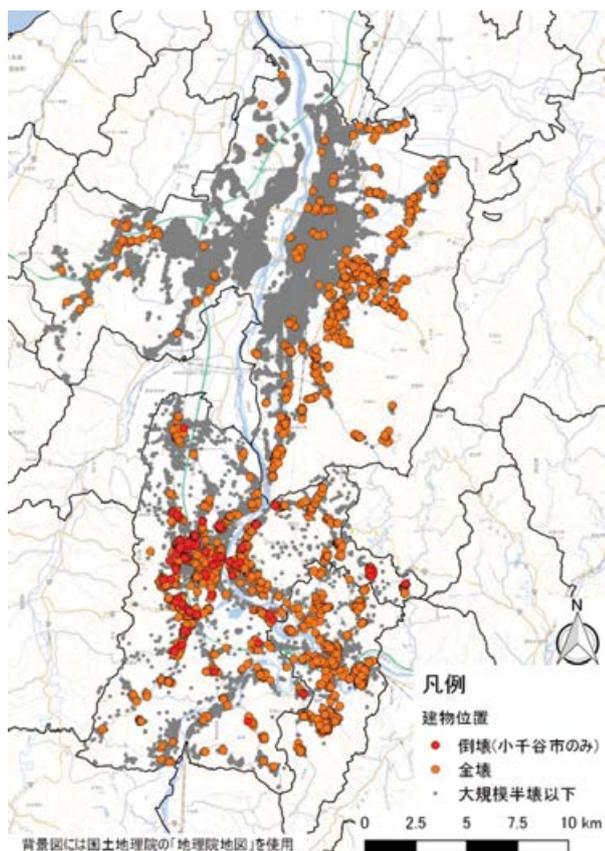


図 4.3.3-5 新潟県中越地震による被害建物の分布

表 4.3.3-2 新潟県中越地震による D-Level 別建物被害棟数推定結果

市	D-Level別建物棟数[棟]				計
	D3以下	D4	D5	D6	
(旧)長岡市	101,941	761	50	23	102,775
(旧)川口町	4,152	439	100	47	4,739
小千谷市	33,967	1,532	126	33	35,658
計	140,060	2,732	276	104	143,172

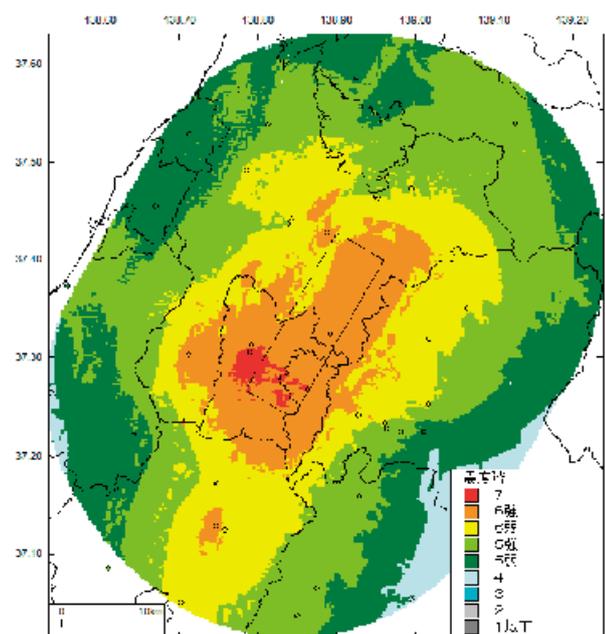


図 4.3.3-6 新潟県中越地震による震度分布の推定結果

新潟県中越地震の人的被害は、消防庁(2013)により公表されている人的被害(表 4.3.3-3)を基に、消防庁(2009)および和藤(2006)に記載された死因等を基に本研究で対象とする地震動を原因とする建物内での死者を抽出(表 4.3.3-4)した。また、和藤(2006)による重症救命例(表 4.3.3-5)のうち、脳血管障害・一酸化炭素中毒・呼吸不全(喘息等)を除く 18 人を医療の介入により救命出来た「Prevented Deaths」として、重症救命例の割合を重傷者数に乗ずることにより重体者数を推定した。

表 4.3.3-3 新潟県中越地震による対象地域の人的被害(消防庁(2009)より抜粋)

被害程度	地域別人的被害[人]				計
	(旧)長岡市	(旧)川口町	小千谷市	その他	
死者	12	6	19	31	68
重傷者	257	38	120	218	633
計	269	44	139	249	701

表 4.3.3-4 新潟県中越地震による対象地域の死因別死者数(消防庁(2009)および和藤(2006)の情報を基に作成)

市町	死者数		
	(計)	外傷(建物内)	その他
(旧)長岡市	12	2	10
(旧)川口町	6	4	2
小千谷市	19	5	14

表 4.3.3-5 和藤(2006)による重症救命例の数

原因	症例数
骨盤骨折	1
クラッシュ症候群	2
胸部外傷	2
ショック	1
多臓器不全	1
多発外傷	1
頭部外傷	2
急性心筋梗塞	1
大腿骨骨幹部骨折	4
熱傷	3
脳血管障害	5
一酸化炭素中毒(車内)	4
呼吸不全(喘息等)	3

上記により対象地域における外傷による人的被害を表 4.3.3-6 のとおり推定した。

表 4.3.3-6 新潟県中越地震による人的被害の推定結果

地域	外傷による人的被害[人]		
	死者数	重体者	重傷者
(旧)長岡市	2	7	250
(旧)川口町	4	1	37
小千谷市	5	3	117
計	11	11	404

② 新潟県中越沖地震

新潟県中越地震の建物被害は、門馬ほか(2018)により罹災証明等から収集された新潟県柏崎市の個別建物被害情報データ(図4.3.3-7)を基に、250 mメッシュ単位での計測震度分布(図4.3.3-8)を用いて「4.3.3(2)① 建物被害の収集方法」により表4.3.3-7のとおり推定した。

表 4.3.3-7 新潟県中越沖地震による柏崎市のD-Level別建物被害棟数推定結果

被害程度	棟数[棟]
D4	2,643
D5	348
D6	74

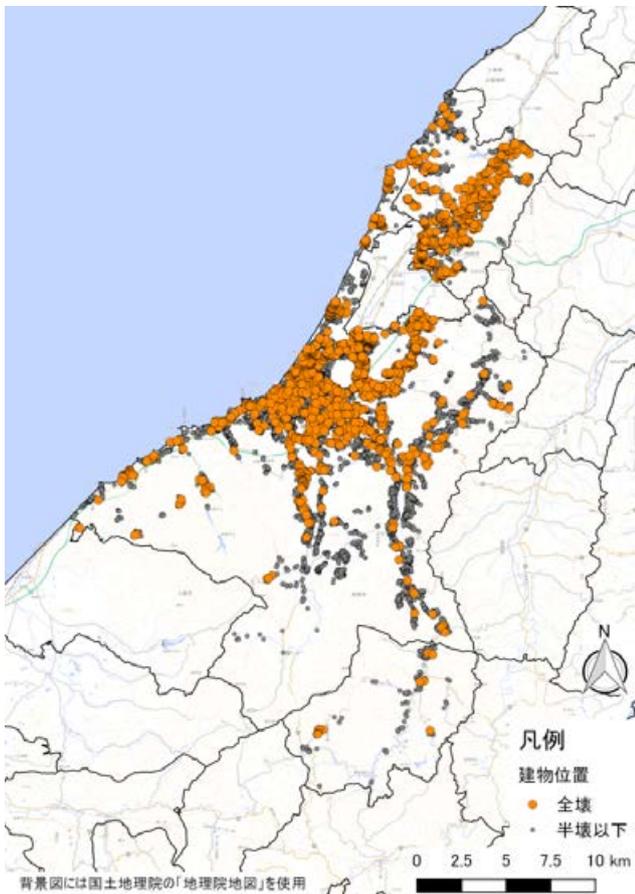


図 4.3.3-7 新潟県中越沖地震による被害建物の分布

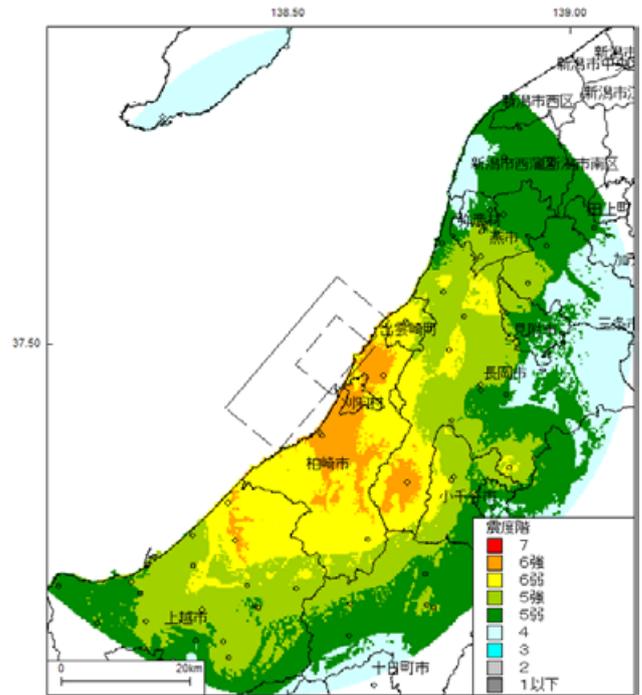


図 4.3.3-8 新潟県中越沖地震による震度分布の推定結果

新潟県中越沖地震による柏崎市における人的被害は表4.3.3-8のとおりある。柏崎市における死者14名の死因(表4.3.3-9)を参照して、ストレスを原因とする4名は本研究で対象とする建物内での外傷による死者ではないと判断して、10名を本研究で対象とする死者とした。また、この重傷者数191人のうち日本集団災害医学会(2008)による重症度別患者数割合(表4.3.3-10)のうち中等症と重篤が重傷者に、重篤者が本研究での重体にそれぞれ相当すると仮定して、中等症+重篤に占める重篤の割合を重傷者に乗じることで重体者数を推定した。

上記により推定した新潟県中越地震による柏崎市における負傷者数を表4.3.3-11に示した。

表 4.3.3-8 新潟県中越沖地震による柏崎市での人的被害(消防庁(2013)より抜粋)

被害程度	人数[人]
死者	14
重傷者	191
軽傷者	1,473
計	1,678

表 4.3.3-9 新潟県中越沖地震による柏崎市での死者の死因

No.	年齢	性別	死 因
1	76歳	男性	建物の下敷きになって死亡。
2	72歳	女性	建物の下敷きになって死亡。
3	78歳	女性	建物の下敷きになって死亡。
4	81歳	女性	建物の下敷きになって死亡。
5	83歳	男性	建物の下敷きになって死亡。
6	83歳	男性	建物の下敷きになって死亡。
7	77歳	女性	外傷性硬膜下血腫により死亡。
8	71歳	女性	建物の下敷きになって死亡。
9	76歳	男性	建物の下敷きになって死亡。
10	47歳	男性	熱傷により死亡。
11	62歳	男性	被災によるストレスのため急性心筋梗塞で死亡。
12	70歳	女性	被災によるストレスのため脳出血で死亡。
13	59歳	男性	被災によるストレスのため胃潰瘍(大量出血)で死亡。
14	59歳	男性	地震や長期入院によるストレスのため死亡。

表 4.3.3-10 新潟県中越沖地震における重症度別患者数割合(日本集団災害医学会, 2008)

重症度	患者数[人]
死亡	9
重篤	17
中等症	46
軽症	33
計	105

表 4.3.3-11 新潟県中越沖地震による人的被害の推定結果

被害程度	人数[人]
死者	10
重体者	52
重傷者	139
軽傷者	1,473
計	1,674

③ 岩手・宮城内陸地震

岩手・宮城内陸地震による建物被害は下村ほか(2016)による個別建物被害情報データ(図 4.3.3-9)を基に、空間補間により推定した 250 m メッシュ単位での計測震度分布(図 4.3.3-10)と、「4.3.3 (2) ① 建物被害の収集方法」により D-Level 別(D4・D5・D6)建物棟数を推定した(表 4.3.3-12)。

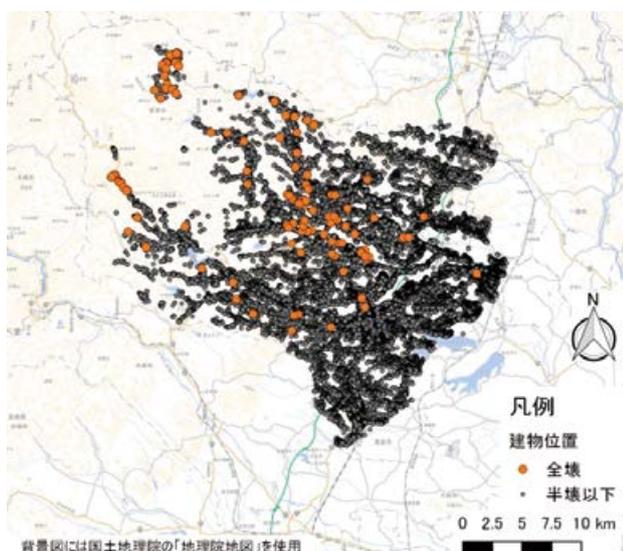


図 4.3.3-9 岩手・宮城内陸地震による被害建物の分布

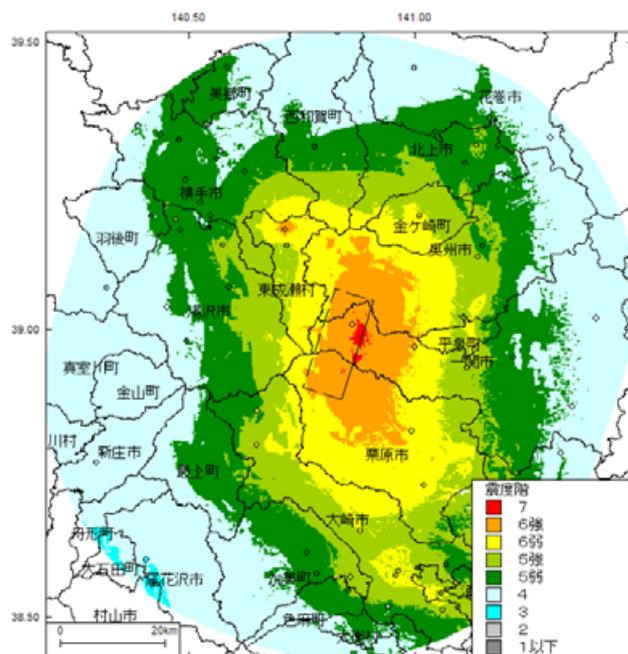


図 4.3.3-10 岩手・宮城内陸地震による震度分布の推定結果

表 4.3.3-12 岩手・宮城内陸地震による栗原市の D-Level 別建物被害棟数推定結果

被害程度	棟数[棟]
D4	138
D5	15
D6	3

消防庁(2010)による岩手・宮城内陸地震の栗原市における人的被害は表 4.3.3-13 のとおりである。死者・行方不明者の死因は表 4.3.3-14 のとおりで、全て屋外で発生したものである。また、行方不明者についても、現時点まで死体が発見されていないことから何らかの土砂災害に遭遇した可能性が高い(牛山・太田, 2008)。従って、栗原市における地震動を直接の原因とする建物内の死者はゼロとなる。

表 4.3.3-13 岩手・宮城内陸地震による栗原市の人的被害(消防庁(2010)より抜粋)

負傷程度	人数[人]
死者	13
行方不明者	4
重傷	28
軽傷	152
計	197

表 4.3.3-14 岩手・宮城内陸地震による栗原市における死者の死因(消防庁(2010)より抜粋)

原因	地区	人数
土砂崩れ	花山地区	3
車両埋没	湯浜温泉	1
生き埋め	駒の湯温泉	7
吊り橋からの落下	花山地区	2

次に、重傷者数 28 人から重体者数を分離する。栗原市立栗原中央病院におけるトリアージ結果(表 4.3.3-15)を基に、トリアージの黄色と赤色が重傷者に相当すると仮定したうえで、重傷者 28 人にトリアージの黄と赤のうち赤の割合($2 \div (11+2)$)が重体に相当するとして 4 人を重体者数と推定した。上記により推定した栗原市の人的被害は表 4.3.3-16 に示したとおりである。

表 4.3.3-15 栗原市立栗原中央病院におけるトリアージ結果

トリアージ色	人数[人]
赤	2
黄	11
緑	39
計	52

表 4.3.3-16 岩手・宮城内陸地震による栗原市の人的被害の推定結果

負傷程度	人数[人]
死者(建物内)	0
重体者	4
重傷者	24
軽傷者	152
計	180

④ 熊本地震(前震)

熊本地震の前震による建物被害は、中村ほか(2016)による空中写真判読により把握された個別建物被害情報を基に収集整理した。上記による全壊建物(図 4.3.3-11)を対象に、空間補間により推定した震度分布(図 4.3.3-12)と「4.3.3(2)① 建物被害の収集方法」により D-Level 別建物被害を表 4.3.3-17 のとおり推定した。

一方、人的被害は死傷者数が把握される前に本震が発生したために、消防庁による被害報等では正確な数を把握する事はできない。そのため、論文等に基づいて前震と本震に人的被害を分離した(後述)。

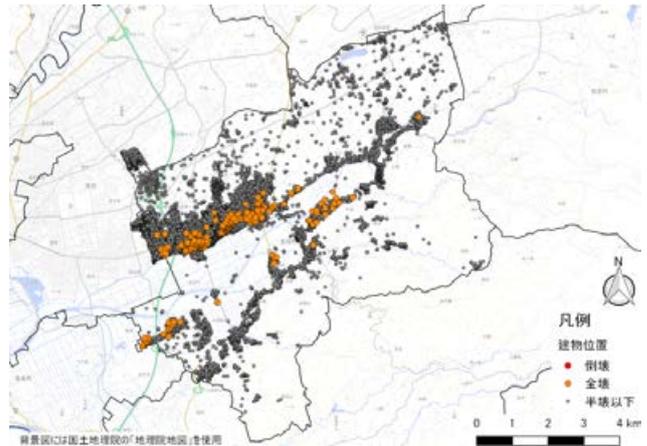


図 4.3.3-11 熊本地震(前震)による被害建物の分布

表 4.3.3-17 熊本地震前震による益城町の D-Level 別建物被害棟数推定結果

被害程度	棟数[棟]
D4	170
D5	42
D6	15

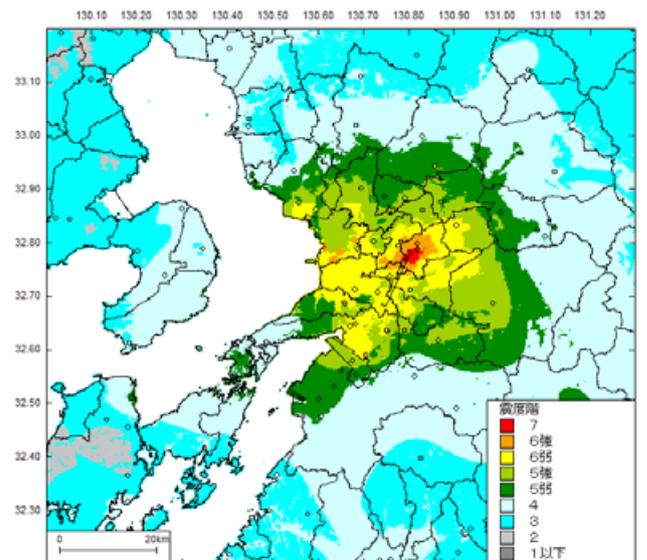


図 4.3.3-12 熊本地震(前震)による震度分布の推定結果

⑤ 熊本地震(本震)

熊本地震の前震による建物被害は、中村ほか(2016)による空中写真判読により把握された個別建物被害情報と、防災科学技術研究所が収集した層破壊建物情報を基に収集整理した。層破壊建物情報は 11 市区町村において、層破壊が発生した建物の緯度・経度を収集したデータで、計 2,390 棟が登録されている(表 4.3.3-18)。本研究では、空中写真判読による個別建物被害情報と層破壊建物情報を、GIS

を用いて結合し、層破壊が発生した建物を倒壊 (D5 もしくは D6) とした。上記により統合した個別建物データによる全壊以上の建物分布を図 4.3.3-13 に示した。上記による全壊以上の被害を受けた建物を対象に、250 m メッシュ単位での震度分布(図 4.3.3-14) と「4.3.3 (2) ① 建物被害の収集方法」により D-Level 別建物被害棟数を推定し、その結果を表 4.3.3-19 に示した。

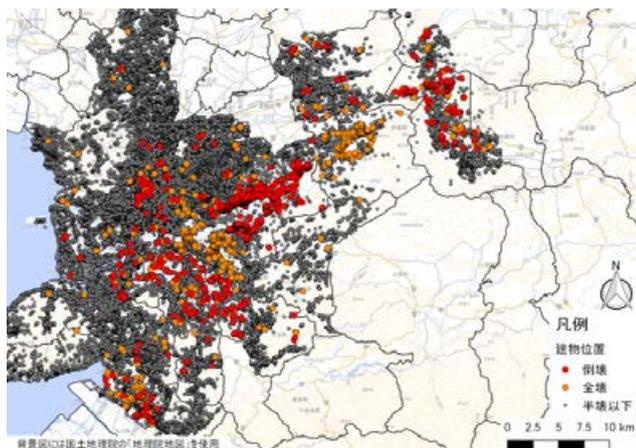


図 4.3.3-13 熊本地震(本震)による被害建物の分布

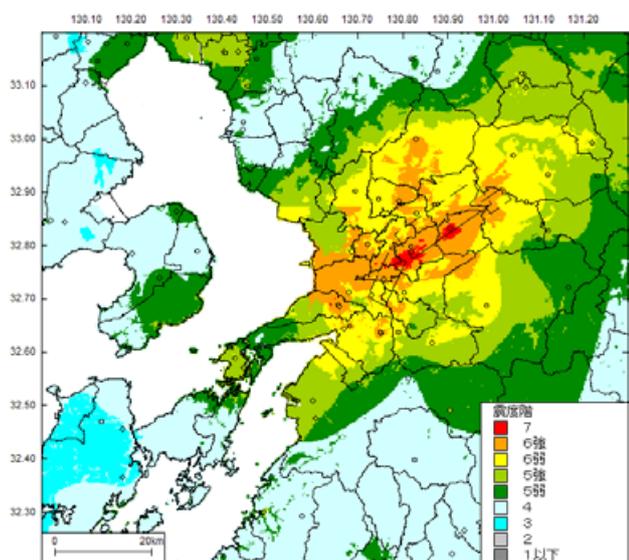


図 4.3.3-14 熊本地震(本震)による震度分布の推定結果

表 4.3.3-18 熊本地震(本震)による市区町村別層破壊建物棟数

市区町村	棟数
43101 熊本市北区	7
43102 熊本市中央区	28
43103 熊本市南区	102
43104 熊本市東区	97
43105 熊本市西区	9
43213 宇城市	34
43214 阿蘇市	37
43403 大津町	18
43433 南阿蘇村	200
43443 益城町	1,754
43444 甲佐町	104
計	2,390

表 4.3.3-19 熊本地震本震による D-Level 別建物被害棟数推定結果

市区町村	D-Level別建物棟数[棟]		
	D4	D5	D6
43101 熊本市中央区	24	24	2
43102 熊本市東区	111	80	16
43103 熊本市西区	9	6	1
43104 熊本市南区	73	78	19
43105 熊本市北区	5	5	1
43211 宇土市	2	0	0
43213 宇城市	73	28	6
43214 阿蘇市	30	30	5
43403 大津町	20	16	1
43432 西原村	140	34	10
43433 南阿蘇村	88	167	10
43441 御船町	37	0	0
43442 嘉島町	178	0	0
43443 益城町	468	1,171	422
43444 宇佐町	10	81	13
(その他)	7	9	5
計	1,268	1,718	507

その他:市町村界の図形からはみ出した建物

人的被害について検討する。表 4.3.3-20 は熊本県の災害情報の市町村别人的被害から対象地域を抜粋したものである。このうち、死者については関連死等を含まない「警察が検視により確認している死者数」を地震による直接的な死者とした。

表 4.3.3-20 熊本地震本震による人的被害(熊本県(2017)より抜粋)

被害程度	人的被害[人]			
	熊本市	益城町	その他	計
死者	4	20	26	50
重傷者	750	134	275	1,159
軽傷者	943	31	576	1,550
計	1,697	185	877	2,759

次に、死者を対象として前震と本震の人的被害を牛山ほか(2016)記載に基づいて分離する。牛山ほか(2016)は新聞等の報道や現地調査等により死者49名^{注2}の発生場所を番地単位での空間精度で特定し、その原因を火災・倒壊・土砂・その他の4つに分類している。このうち「倒壊」は“地震によって生じた構造物の倒壊や部材の落下、家具の転倒などに巻き込まれ、死亡した者”と定義され、本研究で対象とする死者に該当する。このため、「倒壊」による死者数を牛山ほか(2016)および首相官邸(2016)に記載された前震による死者の状況を参照して、前震・本震に整理した(表4.3.3-21)。これによると、熊本地震前震による死者は8名で全てが益城町で発生している。一方で、本震による死者は30名で、そのうち12名が益城町で、3名が熊本市で発生している。

表 4.3.3-21 熊本地震による「倒壊」による死者数

市町村	揺れによる死者数[人]		
	前震	本震	計
熊本市	0	3	3
西原村	0	5	5
南阿蘇村	0	6	6
御船町	0	1	1
嘉島町	0	3	3
益城町	8	12	20
計	8	30	38

次に、負傷者数について熊本大学医学部付属病院(2017)および熊本赤十字病院(2016)に記載されたトリアージ結果(表4.3.3-22)に基づいて、他の地震と同様に赤と黄が重傷者に該当すると仮定して、黄と赤の割合に基づいてトリアージ赤に相当する人数として重体者数を推定した。上記により推定した熊本地震(本震)の人的被害を表4.3.3-23に示した。

なお、ここで本震の人的被害と示した負傷者数については前震の負傷者数と分離できていない。これは、死者については牛山ほか(2016)により前震と本震を分離できたものの、負傷者については前震の負傷者数が把握される前に本震が発生したためである。

注2：牛山ほか(2016)の執筆後に行方不明者1名の遺体が発見されている。

表 4.3.3-22 熊本地震被災地におけるトリアージ結果

トリアージ色	患者数[人]		
	赤十字	付属	計
赤(重症)	68	18	86
黄(中等症)	267	16	283
緑(軽症)	1,059	32	1,091
黒(CPA)	3	1	4
計	1,397	67	1,464

赤十字:熊本赤十字病院
付属:熊本大学医学部付属病院

表 4.3.3-23 熊本地震(本震)による人的被害推定結果

被害程度	人的被害[人]			
	熊本市	益城町	その他	計
死者	3	12	15	30
重体者	175	31	64	270
重傷者	575	103	211	889
軽傷者	943	31	576	1,550
計	1,696	177	866	2,739

(4) 収集した建物被害に基づく ISS 値カテゴリ別人数および死者数の推定

前項までで収集・整理した個別建物被害データおよび2章で述べた250mメッシュ単位での人口モデルを用いてISS値カテゴリ別の人数の推定を行い、人的被害推定用パラメータ検討用のデータセットを作成した。この人口モデルは、国勢調査等による昼夜間人口および時間帯による人口移動モデルを適用して5時・12時・18時の建物属性注3別の建物内滞留者数および流動人口を250mメッシュ単位で推定したものである。そこで、対象とする地震の発生時刻を参考として表4.3.3-24に示した時刻の人口分布を基とした。

表 4.3.3-24 各地震の発生時刻と使用した人口モデルの対象時刻

地震名称	Mj	時刻	時刻
2016年熊本地震(本震)	7.3	1:25	5時
2016年熊本地震(前震)	6.5	21:26	5時
2008年岩手・宮城内陸地震	7.2	8:43	12時
2007年新潟県中越沖地震	6.8	10:13	12時
2004年新潟県中越地震	6.8	17:56	18時

ISS値カテゴリ別人口を作成する際には、上記の250mメッシュ単位の人口モデルを基に、収集整理した個別の建物に人口を配分する必要がある。本研究では250mメッシュ内の建物内滞留人口を建物

注3：建物構造(木造・非木造)、建築年代(木造:5区分、非木造:3区分)、建物用途(住宅・非住宅)

棟数で除して1棟あたりの滞留人口を推定して、それぞれの建物に上記の滞留人口を配分した。その上で、個別建物のD-Level別の被害発生確率に建物滞留人口に乘じ、市町村別に集計してD-Level別建物内滞留人口を推定した。そして表4.3.3-25に示したD-Level別ISSカテゴリ発生確率をD-Level別建物内滞留人口に乘じることにより、市町村別のISS値カテゴリ別人口を求めた。更に、外傷データバンクによるISS値カテゴリ別の死者率を乘じて死者数も推定した。

上記により推定したISS値カテゴリ別人口および死者数の推定結果を、地震毎に表4.3.3-26～表4.3.3-30に示した。

表 4.3.3-25 D-Level 別 ISS 値カテゴリ発生確率
(表 4.3.1-5 を再掲)

ISS値		D-Level別確率		
		D4	D5	D6
～8	軽症・中等症	9.84E-01	7.80E-01	5.33E-01
9～15	重症	1.62E-02	2.20E-01	4.22E-01
16～24	重篤	7.48E-05	8.34E-05	4.33E-02
25～40	瀕死	2.48E-07	9.70E-10	1.86E-03
41～75	死亡相当	9.32E-11	0.00E+00	1.28E-05
計		1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00

表 4.3.3-26 新潟県中越地震での ISS 値カテゴリ別
人数および死者数の推定結果

被害程度	人的被害[人]		
	(旧)長岡市	(旧)川口町	小千谷市
※ 軽症・中等症	895.44	327.33	824.02
重症	85.02	34.40	31.67
重篤	4.67	1.66	0.82
瀕死	0.20	0.07	0.03
死亡相当	0.00	0.00	0.00
死亡	10.31	3.84	8.18

※:ISSカテゴリ別人数

表 4.3.3-27 新潟県中越沖地震での柏崎市の ISS 値
カテゴリ別人数および死者数の推定結果

ISS値		人的被害[人]	
		ISS別	死者
～8	軽症・中等症	1,321	12
9～15	重症	163	4
16～24	重篤	8	1
25～40	瀕死	0	0
41～75	死亡相当	0	0
計		1,493	16

表 4.3.3-28 岩手・宮城内陸地震での ISS 値カテゴリ別
人数および死者数の推定結果

ISS値		人的被害[人]	
		ISS別	死者
～8	軽症・中等症	14	0
9～15	重症	1	0
16～24	重篤	0	0
25～40	瀕死	0	0
41～75	死亡相当	0	0
計		15	0

表 4.3.3-29 熊本地震(前震)での ISS 値カテゴリ別
人数および死者数の推定結果

ISS値		人的被害[人]	
		ISS別	死者
～8	軽症・中等症	448	4
9～15	重症	45	1
16～24	重篤	2	0
25～40	瀕死	0	0
41～75	死亡相当	0	0
計		495	5

表 4.3.3-30 熊本地震(本震)での ISS 値カテゴリ別
人数および死者数の推定結果

市区町村	～8	8～15	16～24	25～40	41～75	死者
	中等症以下	重症	重篤	瀕死	死亡相当	
43101 熊本市中央区	158.15	21.31	0.72	0.03	0.00	1.95
43102 熊本市東区	611.57	90.23	2.59	0.11	0.00	7.70
43103 熊本市西区	22.05	2.41	0.02	0.00	0.00	0.25
43104 熊本市南区	165.89	31.15	0.78	0.03	0.00	2.24
43105 熊本市北区	6.45	1.57	0.02	0.00	0.00	0.09
43211 宇土市	1.16	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01
43213 宇城市	82.77	7.03	0.06	0.00	0.00	0.90
43214 阿蘇市	25.25	3.74	0.10	0.00	0.00	0.32
43403 大津町	34.80	2.90	0.06	0.00	0.00	0.38
43432 西原村	149.23	12.47	0.39	0.02	0.00	1.65
43433 南阿蘇村	147.60	28.86	0.33	0.01	0.00	1.99
43441 御船町	45.96	0.76	0.00	0.00	0.00	0.43
43442 嘉島町	166.64	2.75	0.01	0.00	0.00	1.56
43443 益城町	3,201.40	928.28	41.67	1.78	0.01	52.62
43444 宇佐町	57.46	12.67	0.13	0.01	0.00	0.81
計	4,876.38	1,146.18	46.88	2.00	0.01	72.91

また、上記により推定した死者数を基に、実被害との散布図を作成して図4.3.3-15に示した。これらを見ると多くの市町村で実被害との誤差が倍半分の範囲で推定できているものの、熊本地震本震の被害を過大評価している。この原因としては前震による建物の安全性への不安やライフライン被害による避難のため、建物内滞留人口が通常時よりも少なかったことが考えられる。

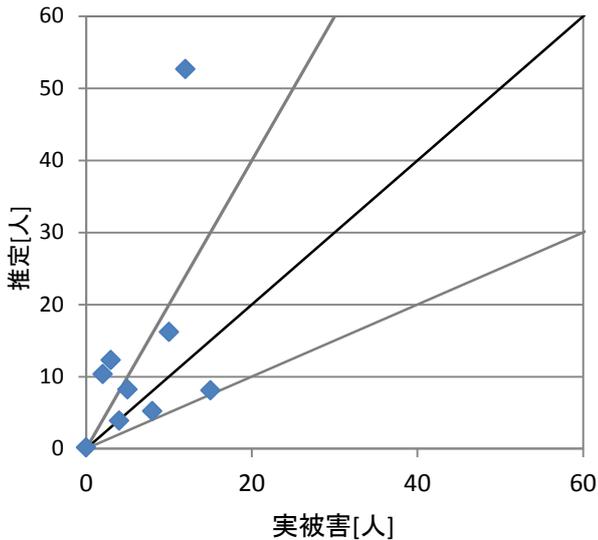


図 4.3.3-15 岡田・中嶋(2015)の方法で試算した市町別の死者数および実死者数

そこで、本研究では前震の建物被害が空中写真判読により明らかになっている益城町を対象として、下記の2パターンで設定した避難率で建物内滞留人口を補正して、死者数を再計算した。

避難①：中央防災会議(2013)による地震発生1日後の避難率(全壊で100%、半壊で13%が避難)

避難②：一部損壊以上で全員が避難し、それ以外の建物も半数が避難する

上記により推定した益城町におけるISSカテゴリ別人数および死者数の推定結果を表4.3.3-31に示した。益城町における本震による死者数は12名(表4.3.3-21)であるため、中央防災会議(2013)による避難率を設定した「避難①」でも過大推定となっている。一方で、一部損壊以上で全員が避難し無被害でも半数が避難すると設定した「避難②」では益城町の死者数を精度良く推定できている。

そのため、人的被害推定用パラメータの検討を行う際には、「避難②」による避難率設定に基づくISS値カテゴリ別人口を用いた。

表 4.3.3-31 熊本地震(本震)でのISS値カテゴリ別人数および死者数の推定結果(避難を考慮した場合)

重症度	人的被害[人]		
	避難①	避難②	避難なし
軽症・中等症	2,709	558	3,173
重症	783	164	908
重篤	33	6	39
瀕死	1	0	1
死亡相当	0	0	0
死者	45	9	53

避難①:中央防災会議(2012)による避難率

避難②:一部損壊以上は全員避難、無被害でも半数が避難

4.3.4 人的被害算出パラメータの設定

本項では、岡田・中嶋(2015)により求められたISS値カテゴリ別人数から、「4.3.3(1)対象とする人的被害程度の定義」で検討した死者・重体・重傷・軽傷の4つの人的被害区分で人的被害を推定するパラメータについて検討する。このうち死者については、外傷データベースによるISS値カテゴリ別死者率を用いて式(4.3.4-1)により推定している。

$$死者数 = \sum_{i=1}^5 [N_i \times RD_i] \quad (4.3.4-1)$$

ここで N_i : ISSカテゴリ i 別の人数 ($i=1:ISS < 9, 2:9 \leq ISS < 16, 3:16 \leq ISS < 25, 4:25 \leq ISS < 40, 5:41 \leq ISS$), $RD_1:0.009, RD_2:0.022, RD_3:0.069, RD_4:0.283, RD_5:0.618$ とする。

上記により推定された死者以外の生存者の重体・重傷・軽傷の内訳を推定する方法を本項において作成する。具体的には死者数の場合と同様に、ISSカテゴリ別の人数に係数(パラメータ)を乗ずる式(4.3.4-2)により推定する。

$$I_k = \sum_{i=1}^5 [N_i \times R_{k,i}] \quad (4.3.4-2)$$

ここで、 I_k : 負傷程度 k となる人数 ($k=1$: 軽傷, 2 : 重傷, 3 : 重体), $R_{k,i}$: 係数 (ISSカテゴリ i から負傷程度 k となる割合) とする。

パラメータの推定は、「4.3.3 過去の被害地震における被害情報の収集整理」で作成した建物被害および人的被害データを基にISS値カテゴリ別人数を推定した後に、係数を0.1%刻みで変化させながら人的被害を推定し、実被害との誤差指標(式4.3.4-3)が最小となる係数を検索する。

$$E = \sqrt{\sum_n [(I_k - Act_k)^2] / n} \quad (4.3.4-3)$$

ここで、 E : 誤差指標, n : 地域数, Act_k : 負傷程度 k の実被害とする。

係数の検索は、最初に重傷者数を求める係数を最初に求める事とする。これは、重傷者数が被害情報で生の数字として得られたものであるためであること、重体を重傷の内数として表示することから重体を求める上でも重要な値となるためである。次に、重傷者数は重傷者数の内数であることから、重傷者を求める係数を上限として、係数を0.1%刻みで変化させながら誤差指標が最小となる係数の組み合わせを検索する。軽傷者数を推定する係数は、負傷者数は重傷者数と軽傷者数の和となることから、軽傷者を求める係数は1から重傷者を減じた値とする。

また、係数の検索にあたっては、実態に即した係数が検索されるようにするため、表4.3.4-1に示した制約条件を付して検索する事とした。上記により推定したISSカテゴリから人的被害程度推定用パラメータを表4.3.4-2に示した。

表 4.3.4-1 パラメータ検索の際に設定した制約条件

ISSカテゴリ		本件で対象とする人的被害区分	
		重傷	重体
軽症・中等症	(1-8)	上限:1-(死亡率)	上限:死亡率+重傷率 (重症→重体未満とする)
重症	(9-15)	上限:1-(死亡率) (軽症・中等症→重傷以上)	上限:重傷率 (瀕死→重体の率未満)
重篤	(16-24)	下限:1-(死亡率)/2 上限:1-(死亡率)	上限:重傷率 (瀕死→重体の率未満)
瀕死	(25-40)	1-死亡率とする	上限:重傷率
死亡相当	(41-)	1-死亡率とする	1-死亡率とする

表 4.3.4-2 被害推定パラメータの推定結果

ISSカテゴリ		推定結果			死亡率	
i	ISS値	軽傷	重傷	重体		
1	1~8	軽症・中等症	83.2%	15.9%	0.9%	0.9%
2	9~15	重症	81.6%	16.2%	12.0%	2.2%
3	16~24	重篤	0.0%	93.1%	93.1%	6.9%
4	25~40	瀕死	0.0%	71.7%	71.7%	28.3%
5	41~	死亡相当	0.0%	38.2%	38.2%	61.8%

※死亡率は外傷データバンクによる

4.3.5 被害地震を対象とした人的被害の試算

本項では、前項において設定した被害推定用パラメータによる人的被害推定手法の妥当性を検証するために、過去に発生した地震の人的被害を試算した。人的被害の試算は、まず建物被害に実被害データを用いて人的被害を推定するとともに、実被害と比較した。次に、250 mメッシュ単位での曝露モデル(人

口および建物)を用いて、過去の地震による建物被害を推定した後に、前項までによる人的被害推定手法を適用して、実際に即時評価を行う観点での問題点等について検討した。

(1) 建物被害に実被害データを用いた場合の推定

建物被害に実被害データを用いた場合の人的被害推定は、「4.3.3 (4) 収集した建物被害に基づくISS値カテゴリ別人数および死者数の推定」により推定したISS値カテゴリ別人数に、前項で推定した人的被害推定パラメータ(表4.3.4-2)を乗じて軽傷・重傷・重体の人数を求めて、その結果を表4.3.5-1に示した。

表 4.3.5-1 建物実被害データを用いた人的被害の推定結果

地震名	市町村名	人的被害推定結果[人]			
		軽傷	重傷※	重体※	死者
新潟県中越地震	(旧)長岡市	814.4	160.6	22.7	10.3
	(旧)川口町	300.4	59.2	8.7	3.8
	小千谷市	711.4	136.9	12.0	8.2
新潟県中越沖地震	柏崎市	1,232.2	244.6	39.6	16.2
岩手・宮城内陸地震	栗原市	12.3	2.4	0.2	0.1
熊本地震(前震)	益城町	452.2	88.5	12.1	5.7
熊本地震(本震)	益城町	604.9	123.3	31.8	9.3

※ 重傷に重体を含む(重体は重傷の内数)

重傷者数推定値と実被害の散布図(図4.3.5-1)を見ると、岩手・宮城内陸地震の栗原市を除く全ての市町で実被害と推定結果は倍半分の範囲に含まれている。一方で、栗原市では実被害と比べて少ない重傷者数となっている。これは岩手・宮城内陸地震の実被害(重傷者)に土砂災害など本手法で対象としない原因による重傷者が含まれていることが、考えられる。

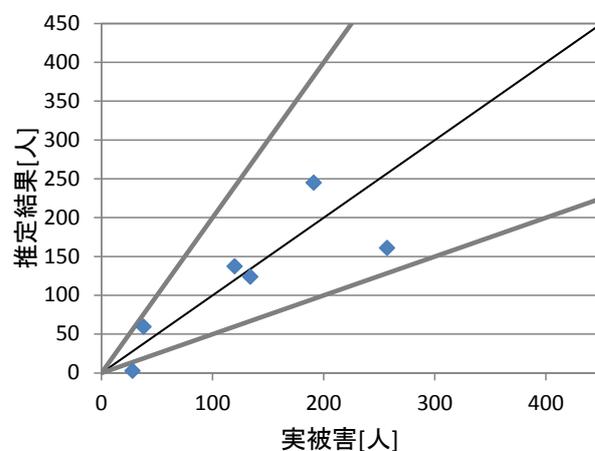


図 4.3.5-1 重傷者数の推定結果と実被害の比較(黒線は推定値と実被害が同値、灰色線は倍半分であることを示す)

重体者数推定値と実被害の散布図(図4.3.5-2)を見ると、新潟県中越地震の被災地で実被害よりも推定被害を大きく評価する傾向がみられた。これは、新潟県中越地震以外の地震はトリアージ結果で「赤」となる水準を対象とした一方で、新潟県中越地震の重体者の実被害は、和藤(2006)の記載を参照して、医療の介入により救命できた人数に基づいている。そのため、他の地震よりも重篤な人的被害の人数を実被害としたことが考えられる。

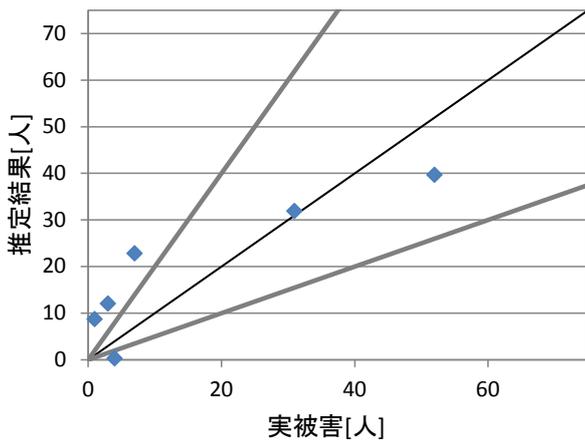


図 4.3.5-2 重体者数の推定結果と実被害の比較(黒線は推定値と実被害が同値, 灰色線は倍半分であることを示す)

(2) 被害関数による建物被害推定結果を用いた人的被害推定

本項では、実際の人的被害推定を行う場合を想定して、過去に発生した地震を対象として、250 m メッシュ単位の曝露モデルおよび面的に推定した震度分布を用いて人的被害を推定した。対象とする地震および地域は表 4.3.5-2 に示したとおりであり、地震の発生時刻に最も近い人口分布と考えられる時刻の人口モデルを使用した。

人的被害は、まず建物被害関数により建物属性別の建物被害率を推定した後に、人口モデルによる建物属性別建物内滞留人口に上記の被害率を乗じて D-Level 別建物内滞留人口を推定した後に、岡田・中嶋(2015)の手法による ISS 値カテゴリ別人口に人的被害推定用パラメータ(表 4.3.4-2)を乗じることでより推定する。ここで、木造建物の D-Level 別被害率は中嶋・岡田(2008)の損傷度関数および耐震評点分布を使用し、非木造建物については中央防災会議

(2012)による被害関数(図 4.3.5-3)を使用して全壊率を求めた上で、全壊率を3等分して D4・D5・D6 それぞれの被害率とした。

表 4.3.5-2 被害推定の対象とした地震および人口モデルの時刻

地震名称	M	発生日時	使用時刻 ^{※2}	対象範囲
新潟県中越地震	6.8	10月23日17:56	18時	新潟県内 ^{※1}
新潟県中越沖地震	6.8	7月16日10:13	12時	新潟県内 ^{※1}
岩手・宮城内陸地震	7.2	6月14日8:43	12時	宮城県内・岩手県内 ^{※1}
東北地方太平洋沖地震	9.0	3月11日14:46	12時	栃木県内
長野県北部の地震 (神城断層地震)	6.7	11月22日22:08	5時	長野県内 ^{※1}
熊本地震(前震)	6.5	4月14日21:26	5時	熊本市、益城市
熊本地震(本震)	7.3	4月16日1:25	5時	熊本市、宇土市、宇城市、阿蘇市、大津町、西原村、南阿蘇村、御船町、嘉島町、益城市、宇佐町

※1 記載の範囲のうち震源からの距離が50km以内
 ※2 人口モデルの3時刻(5時・12時・18時)のうち使用した時刻

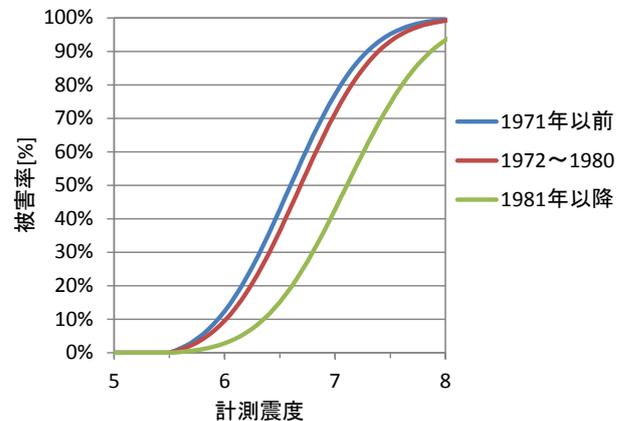


図 4.3.5-3 中央防災会議(2012)による計測震度と全壊率の関係

人的被害推定に先立って、棟数ベースでの建物被害を推定し実被害と比較した。これは、人的被害を建物被害推定結果に基づいて推定しているため、建物被害推定の精度を向上する事が重要なためである。建物被害推定結果として、市区町村単位での建物全壊棟数の推定結果と実被害の散布図を図 4.3.5-4 に示した。これをみると、多くの市町村で実被害を上回っている。この原因としては、本項で使用している曝露モデルの建築年代が課税台帳による建築年に基づいて設定しているため、建物耐力が強まると考えられる耐震補強や大規模修繕が行われても建築年は変わらないために、実際より弱い耐力分布で被害を推定することになり、建物被害を過大評価した可能性が考えられる。

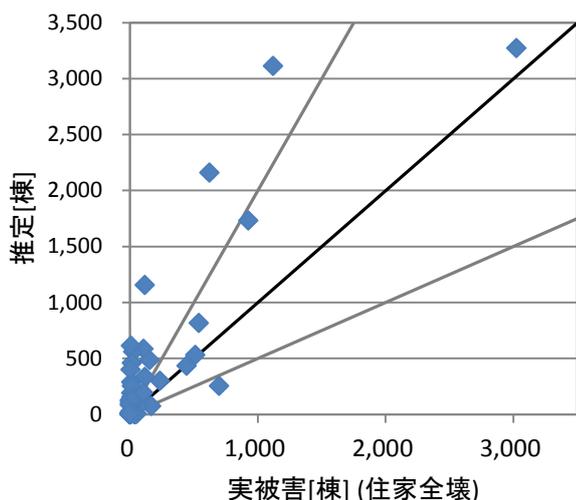


図 4.3.5-4 建物全壊棟数の市町村別推定結果と実被害の比較(黒線は推定値と実被害が同値, 灰色線は倍半分であることを示す)

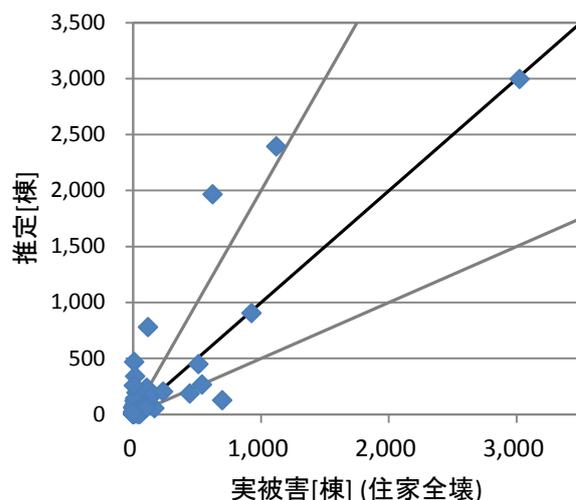


図 4.3.5-5 1970年以前の耐震評点分布を修正した場合の全壊棟数推定結果と実被害の比較(黒線は推定値と実被害が同値, 灰色線は倍半分であることを示す)

そこで、本研究では建物被害推定の際に、下記2点の調整を行った。まず、木造建物被害推定において1970年以前の建物についても1971年～1980年の耐力分布を使用した。次に、藤原ほか(2018)と同様に全ての構造において計測震度5.5以下では全壊率をゼロとしたうえで、被害の立ち上がりを調整した。上記による棟数ベースでの建物被害推定結果と実被害を後述の人的被害とともに表 4.3.5-3 および散布図を図 4.3.5-5 に示した。調整前と比較すると過大評価傾向は改善されている。

前記による建物被害推定に基づいて人的被害を推定し、消防庁の被害報による実被害とそのまま対比できる重傷者数の推定結果を表 4.3.5-3 に示すとともに、実被害との散布図を図 4.3.5-6 に示した。散布図(図 4.3.5-6)を見ると重傷者数の推定結果が実被害の倍以上となっている市区町村が目立つ。これらは熊本地震(本震)の被災地で、これらを除いた散布図(図 4.3.5-7)では多くの市区町村の重傷者数が倍半分の範囲に収まっている。熊本地震(本震)については、前述のとおり前震によって建物外へ避難していたために地震発生時の建物内滞留人口が少なかった可能性が考えられる。このほか、重傷者数の推定結果が倍半分の範囲から大きく外れている市区町村の多くは建物被害の誤差も大きいことから、人的被害推定誤差の原因は建物被害推定の誤差と考えられる。

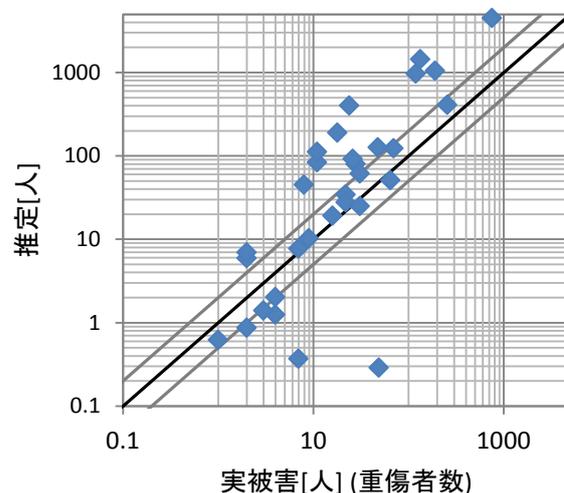


図 4.3.5-6 被害関数による建物被害に基づく市町村別人的被害の推定結果および実被害との比較(黒線は推定値と実被害が同値, 灰色線は倍半分であることを示す)

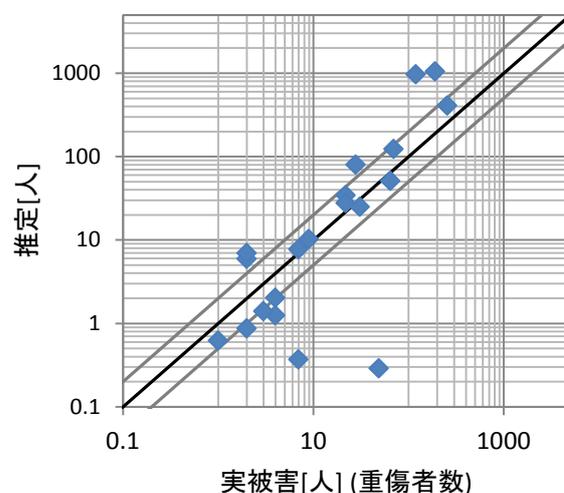


図 4.3.5-7 熊本地震(本震)を除く重傷者数推定結果と実被害の散布図(黒線は推定値と実被害が同値, 灰色線は倍半分であることを示す)

表 4.3.5-3 市区町村別建物被害・人的被害推定結果

地震	市区町村	全壊棟数[棟]		重傷者数[人]	
		推定	実被害	推定	実被害
中越地震	長岡市	902	927	408	257
	柏崎市	0	38	0	13
	小千谷市	1,963	622	968	120
	加茂市	0	0	0	1
	十日町市	234	107	123	70
	見附市	1	52	0	49
	魚沼市	74	75	34	22
	南魚沼市	0	7	0	10
中越沖地震	津南町	0	0	0	3
	長岡市	118	10	51	65
	柏崎市	2,391	1,121	1,047	191
	小千谷市	1	0	1	1
	十日町市	0	1	0	0
	見附市	0	0	0	0
	燕市	0	2	0	3
	上越市	63	14	28	22
	出雲崎町	21	17	6	2
	刈羽村	54	166	25	31
岩手・宮城 内陸地震	一関市	56	1	15	0
	奥州市	22	1	8	7
	西和賀町	0	0	0	0
	金ケ崎町	1	0	0	0
	平泉町	0	0	0	0
	登米市	0	0	0	2
	栗原市	191	27	80	28
	大崎市	12	1	10	9
	涌谷町	0	0	0	0
	美里町	1	0	0	7
東北地方 太平洋沖地震	宇都宮市	466	9	252	0
	足利市	0	1	0	0
	鹿沼市	0	0	0	0
	日光市	60	0	34	0
	小山市	2	0	1	0
	真岡市	83	12	56	0
	大田原市	3	7	2	4
	矢板市	0	51	0	0
	那須塩原市	4	12	2	0
	さくら市	1	2	1	0
	那須烏山市	17	66	7	2
	下野市	0	0	0	0
	上三川町	0	0	0	0
	益子町	16	14	7	0
	茂木町	18	0	8	0
	市貝町	141	16	58	0
	芳賀町	337	16	208	0
高根沢町	255	7	120	0	
長野県北部 の地震	那須町	41	40	19	0
	那珂川町	0	7	0	0
	長野市	5	5	1	2
	大町市	0	2	0	0
	白馬村	3	37	1	4
熊本地震 (前震)	小谷村	3	33	1	3
	小川村	9	2	3	0
熊本地震 (本震)	熊本市	2,039	-	689	-
	益城町	3,106	-	1,021	-
	熊本市	7,564	2,457	4,484	759
	宇土市	775	116	400	24
	宇城市	262	539	126	48
	阿蘇市	104	118	45	8
	大津町	171	154	92	26
	西原村	445	512	191	18
	南阿蘇村	123	697	61	31
	御船町	184	444	84	11
	嘉島町	200	235	112	11
	益城町	2,991	3,026	1,438	134
甲佐町	55	105	19	16	

4.3.6 人的被害推定手法のまとめ

本節では、建物内部空間の損失を伴うような深刻な建物被害に着目した岡田・中嶋(2015)の手法を基に、生命維持のためには直ちに処置が必要な重体者数と内閣府被害認定基準による重傷者・軽傷者数を推定する人的被害推定用パラメータを設定することにより人的被害推定手法を開発した。その上で、設定したパラメータの妥当性を確認するために、過去の被害地震を対象に人的被害を推定し、実被害との誤差が概ね倍半分程度で市町村単位での人的被害推定が可能であることを確認した。

その一方で、熊本地震(本震)では人的被害を過大に推定する傾向がみられた。この原因としては、本震発生前に発生した前震による建物外への避難等により地震発生時の建物内滞留人口が人口モデルよりも少なかった可能性が考えられる。従って、熊本地震のように複数回にわたって強い地震が発生した場合における、2回目以降の人的被害を推定する際には、建物外への避難等を考慮した建物内滞留人口とする必要があろう。

参考文献

中央防災会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ(2012)：南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html(2018年11月8日確認)

中央防災会議 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ(2013)：被害想定項目及び手法の概要、南海トラフ巨大地震の被害想定について(第二次報告) http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/index.html(2018年11月29日確認)

藤原広行・佐伯琢磨・中村洋光・河合伸一・森川信之・前田宜浩・はお憲生・内藤昌平・東宏樹・岩城麻子・清水智・小丸安史・若浦雅嗣・時実良典・早川譲(2018)：全国を対象とした地震リスク評価手法の検討、防災科学技術研究所研究資料, No.415, 450pp, 防災科学技術研究所。

福島誠志・河田恵昭・西村明儒・林春男・田中聡(1997)：EDA手法を用いた人的被害の推定法の開発、地域安全学会論文報告集, 7, 52-55。

厚生労働省(2014)：災害医療用語集, 広域災害救急医療情報システム, <http://www.wds.emis.go.jp/>

- (2011年11月29日確認)
- 救急振興財団(2004):救急搬送における重症度・緊急度判断基準作成委員会報告書,
<http://www.fasd.or.jp/tyousa/hanso01.pdf>(2018年11月8日確認)
- 熊本大学医学部付属病院(2017):熊本地震熊本大学医学部付属病院記録集,<http://www.kuh.kumamoto-u.ac.jp/kuh/images/book/kirokusyu.pdf>(2018年11月29日確認)
- 熊本県(2017):平成28年(2016年)熊本地震等に係る被害状況について【第253報】,
http://www.pref.kumamoto.jp/common/UploadFileOutput.ashx?c_id=3&id=15459&sub_id=236&flid=117913(2018年11月29日確認)
- 熊本赤十字病院(2016):特集「熊本地震」,メディカルキャンパス, No.37, <http://www.kumamoto-med.jrc.or.jp/facilities/magazine/pdf/medicalcampus37.pdf>(2018年11月29日確認)
- 毎日新聞(2011):コトバ解説「重症」と「重傷」と「重体」の違い,
<https://mainichi.jp/articles/20110303/mul/00m/040/044000c>(2018年11月28日確認)
- 門馬直一・中村洋光・藤原広行・内藤昌平・下村博之・山田哲也(2018):地震建物被害空間情報データベース構築と建物被害曲線検討,第15回日本地震工学シンポジウム,2924-2933.
- 中嶋唯貴・岡田成幸(2008):時間軸上の死者低減率最大化を主目標とした木造住宅耐震化戦略の策定—東海・東南海連動型地震を対象とした東海4県への適用事例—,日本建築学会構造系論文集,73-623,79-86.
- 内閣府(2001):災害の被害認定基準について,平成13年6月28日府政防第518号内閣府政策統括官(防災担当)通知,
<http://www.bousai.go.jp/taisaku/unyou.html>(2018年11月8日確認)
- 中村洋光・門馬直一・藤原広行・佐伯琢磨(2016):空中写真判読による熊本地震前震の益城町の建物被害推定,日本地震学会講演予稿集秋季大会,S21-P10.
- 日本外傷学会(2017):AIS2005 Update2008 日本語対訳版,へるす出版.
- 日本救急医学会・日本外傷学会(2018):日本外傷データバンク,<https://www.jtcr-jatec.org/traumabank/>(2018年11月28日確認)
- 日本集団災害医学会(2008):新潟県中越沖地震で行われた医療活動について,平成19年新潟県中越沖地震調査特別委員会報告書,
https://jadm.or.jp/od/toku-iin/h19_chuetsuoki_houkoku.pdf(2018年11月29日確認)
- 日本集団災害医学会(2010):平成20年岩手・宮城内陸地震調査特別委員会報告書,
https://jadm.or.jp/od/toku-iin/iwatemitagi_houkoku.pdf(2018年11月29日確認)
- 新潟県(2013):平成19年新潟県中越沖地震被害状況(2013年4月11日現在),
<http://www.pref.niigata.lg.jp/kikitaisaku/1196093798397.html>(2017年10月18日確認)
- 岡田成幸・中嶋唯貴(2015):大地震に伴う人的被害の重症度指標別詳細評価法の提案～想定南海トラフ巨大地震による震動及び津波被害を例に試算～,厚生労働科学研究費補助金(健康安全・危機管理対策総合研究事業),大規模地震に対する地域保健基盤整備実線研究平成26年度総括・分担研究報告書,研究代表者:犬塚君雄.
- 佐伯琢磨・中村雅紀・渡辺敬之・翠川三郎(2001):地震による死傷者数および負傷に対する治療費用の評価方法,地域安全学会論文集,3,133-140.
- 下村博之・藤原広行・中村洋光・門馬直一・山田哲也・藤澤誠二(2016):新潟県中越地震と岩手・宮城内陸地震の震度分布と建物被害の関係,日本地震工学会・大会-2016,2-23.
- 消防庁(2009):平成16年(2004年)新潟県中越地震(確定報),
<http://www.fdma.go.jp/bn/2009/detail/581.html>(2018年11月29日確認)
- 消防庁(2010):平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震(第79報),
<http://www.fdma.go.jp/bn/2008/detail/639.html>(2018年11月29日確認)
- 消防庁(2013):平成19年(2007年)新潟県中越沖地震(確定報),
<http://www.fdma.go.jp/bn/2007/detail/580.html>(2018年11月29日確認)
- 消防庁(2017):平成29年版 救急救助の現況,

http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/fieldList9_3.html

(2018年11月8日確認)

首相官邸(2016):熊本県熊本地方を震源とする地震
について(平成28年4月15日14:30現在),

<http://www.kantei.go.jp/jp/headline/pdf/20160415/higai04151430.pdf>(2018年11月29日確認)

高井伸雄・岡田成幸(2001):地震被害調査のための
鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン分類,日
本建築学会構造系論文集, 549, 67-74.

東京都(1997):東京における直下地震の被害想定に
関する調査報告書, 869pp.

東京都(2013):トリアージハンドブック,

<http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/iryo/kyuukyuu/saigai/triage.files/toriaji.pdf>(2018年11月29日確認)

牛山素行・太田好及(2009):平成20年(2008年)岩手・
宮城内陸地震による死者・行方不明者の特徴,自
然災害科学, 28-1, 59-66.

牛山素行・横幕早季・杉村晃一(2016):平成28年
(2016年)熊本地震による人的被害の特徴,自然災
害科学, 35-3, 203-215.

和藤幸宏・大西一嘉(2001):Protracted Deaths,
Preventable Deaths, and Prevented Deaths in an
Earthquake—Prevented Deathsの概念と意義—,東
濃地震科学研究所報告, 7, 51-54.