

(別記5-1)

活動の成果概要

2019年度 土佐清水ジオパーク構想活動支援事業

【事業対象者】 池田雄一

【所属】 高知工業高等専門学校

活動の名称

土佐清水市の地形特性や人口減少を考慮した
南海トラフ巨大地震に対する地震建物被害に関する研究

土佐清水市の地形特性や人口減少を考慮した 南海トラフ巨大地震に対する地震建物被害に関する研究

目次

第1章	はじめに	・・・1
1.1	研究の背景	・・・1
1.2	研究目的	・・・1
第2章	研究方法	・・・2
第3章	土佐清水市の表層地盤特性	・・・3
3.1	土質柱状図を用いた地盤地震応答解析	・・・3
3.2	作成した地表強震動の周期特性	・・・8
3.3	強震記録を用いた表層地盤特性	・・・9
第4章	土佐清水市の建物の分布状況	・・・11
4.1	土佐清水市全体の建物建設年	・・・11
4.2	空き家について	・・・20
4.2.1	全国的な空き家の現状	・・・20
4.2.2	土佐清水市の空き家の状況	・・・21
4.2.3	空き家の特徴	・・・22
4.2.4	空き家の状況のランク分け	・・・23
4.3	空き家の分布（調査地区の現地調査）	・・・24
第5章	空き家の耐震性低下を考慮した木造住宅の地震応答解析	・・・25
5.1	木造建物の解析モデル	・・・25
5.2	土佐清水市の表層地盤の増幅特性をふまえた、建物の経年劣化および空き家の耐震性低下を考慮した木造住宅の地震応答解析	・・・26
5.3	GISによる地震建物被害可視化	・・・36
第6章	結び	・・・42
	謝辞	・・・42
	参考文献	・・・42
	本研究に関連して行った研究発表等	・・・43
	本研究に関連して行った講演等	・・・43

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

日本は世界でも有数の地震大国であり、幾度となく地震被害を受けている。そして今最も警戒されている地震の一つが南海トラフ巨大地震である。近い将来発生するといわれている南海トラフ巨大地震は、日向灘から御前崎付近までの広範囲の震源域が震源となり、M9クラスの巨大地震になると考えられている。このような最大クラスの巨大地震に対して、自治体レベルではその防災計画が、個人レベルでは建物の耐震性の向上が求められている。

研究対象地である土佐清水市は、高知県の西部に位置しており、南海トラフ巨大地震において震源の南海トラフに近く、大きな被害が出るといわれている。またここ土佐清水市は1950年には約31,000人あった人口が2018年には13,000人となった人口減少が進行している地域でもある。

1.2 研究の目的

本研究は昨年度の研究¹⁾を引き継いで行う。昨年度の研究では、清水地区と窪津エリアで、建物の建設年とJ-SHIS(地震ハザードステーション)の地盤増幅を考慮した地震建物被害を考察した。今年度は土佐清水市全体の地震建物被害を取り扱う。地盤増幅はJ-SHISではなく、現在までに観測されている工学的基盤強震動から、土佐清水市のボーリング柱状図を用いて地表強震動を作成することで考慮した。そしてその地表強震動を用いて土佐清水市の木造住宅の地震応答解析を行い、木造住宅の1階地震最大応答変位を計算する。さらに解析により得られた木造住宅の1階地震応答変位によるデータをGISを使用して、土佐清水市の街がどのような地震建物被害となるのかを数パターンにわたって可視化する試みを行う。

第2章 研究方法

地震による建物被害の対策において、その建物の建設年は重要な指標となる。また土佐清水市は人口減少が進んでいる地域であり、空き家率が高いという特徴がある。空き家は手入れされないことなどにより耐震性が低下する。これより、建物の建設年とともにその建物が空き家である場合、傷み具合などによって地震による建物被害は変化し、その対策において空き家であることは重要な指標となる。

そこで本研究では、土佐清水市から提供して頂いた建物の建設年情報と、現地調査によって得た空き家の情報を活用して研究を進めていく。まず公開されている土質柱状図を利用して土佐清水市の地盤増幅(揺れやすさ)を考慮する。土佐清水市の工学的基盤に、過去に観測された工学的基盤強震動を入力し、成層地盤地震応答解析プログラム(k-SHAKE)を用いて地表強震動を計算する。そして、この地表強震動を木造住宅の経年劣化を考慮した振動解析モデルに入力して地震応答解析を行って、木造住宅の1階地震最大応答変位を計算した。また空き家は、その状態による耐震性低下を考慮した振動解析モデルに入力し地震応答解析を行い、空き家の1階地震最大応答変位を計算した。さらに解析により得られた木造住宅の地震応答によるデータをGISを使用することによって土佐清水市の地震建物被害を数パターンにわたって可視化する試みを行った。

図2-1に研究フローを示す。

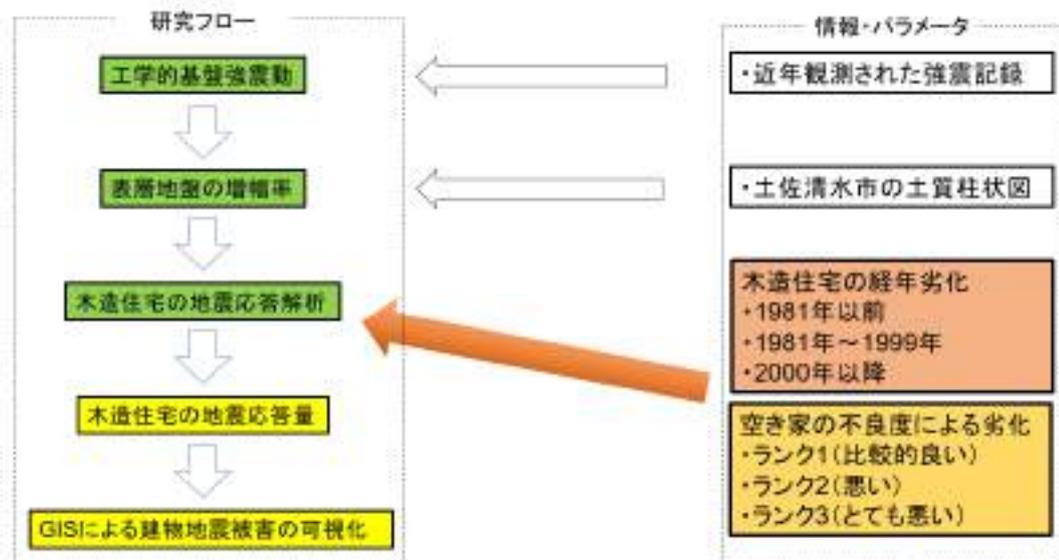


図2-1 研究フロー

3 章 土佐清水市の表層地盤特性

3.1 土質柱状図を用いた地盤地震応答解析

土佐清水市の地盤増幅を考慮するために公開されているこうち地盤情報公開サイト²⁾と防災科学技術研究所強震観測網 (Kik-net)³⁾の土質柱状図を利用する。過去の地震において工学的基盤上で観測された地震動を用いて、土佐清水市の各地点の土質柱状図から得られた地盤データを利用し、図 3-3 に示すように土佐清水市の工学的基盤に工学的基盤地震動を入力する。そして成層地盤地震応答解析プログラム (k-SHAKE)⁴⁾を用いて、地盤地震応答解析を行って、土佐清水市の表層地盤特性を考慮した地表強震動を計算した。

地表強震動の作成方法の 1 つの事例として、土佐清水市浦尻 (KOCH08、Kik-net) の地表強震動の作成を示す。地盤データについては、表 3-4 に示す KOCH08 (土佐清水市・浦尻) の地盤データを用いる。減衰は 5% で地盤の等価線形解析を行った。工学的基盤には、表 3-2 及び表 3-3 の過去国内で観測された工学的基盤地震動を入力した。例として 2 つの地表強震動を図に示す。図 3-4 に示す 2000 年鳥取県西部地震の日野で観測された NS 成分の工学的基盤地震動を KOCH08 (土佐清水市・浦尻) の工学的基盤に入力して、地盤の地震応答解析を行った。その地表強震動を図 3-5 に示す。同じ手法によって、2003 年十勝沖地震の白糠南で観測された EW 成分の工学的基盤地震動と、これをもとに作成した地表強震動を図 3-6 及び図 3-7 にそれぞれ示す。

同じようにして土佐清水市の 15 地点の地表強震動を作成した。



图 3-1 地表強震動作成地点地図

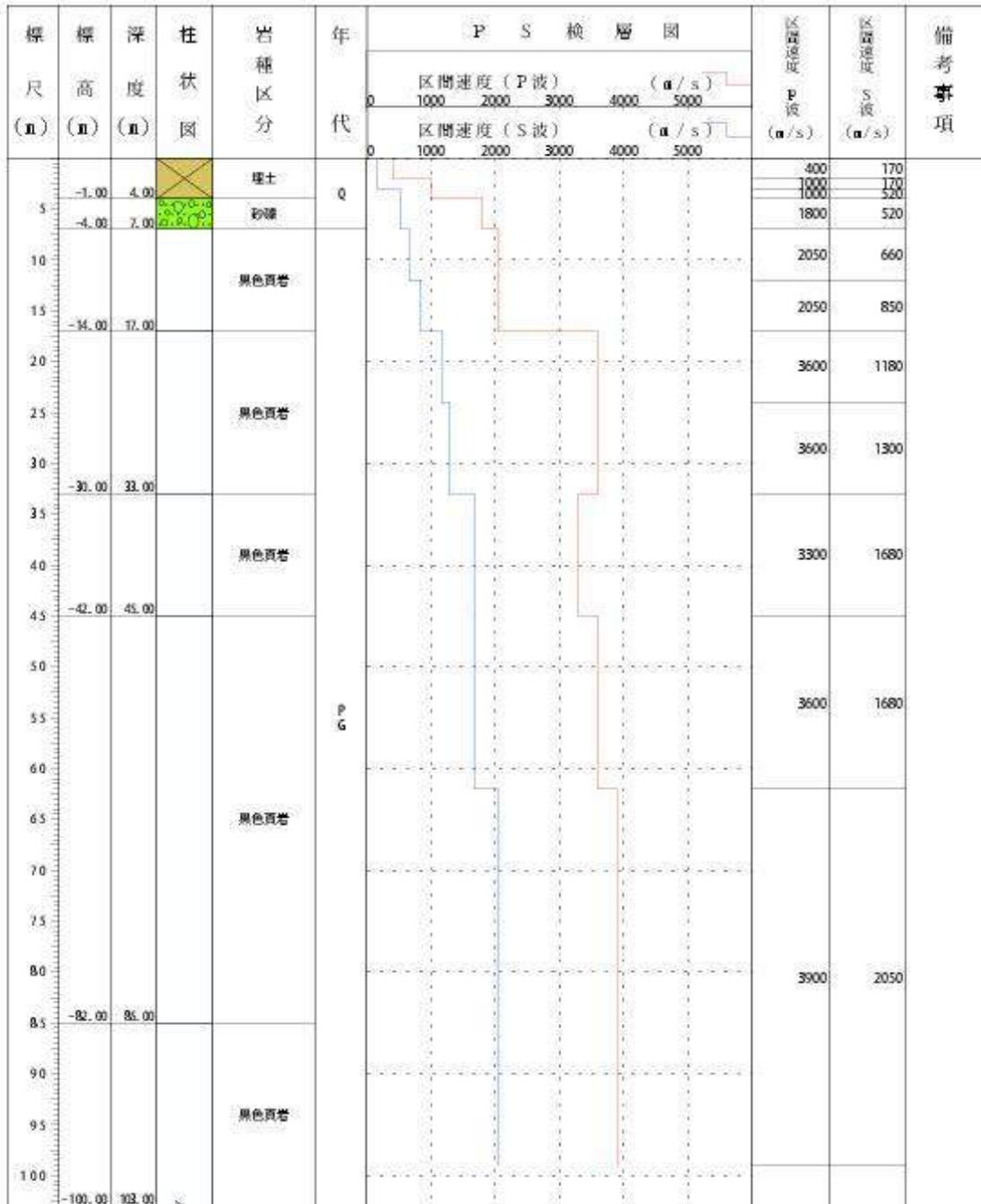
表 3-1 地表強震動作成地点

1	下川口	6	浦尻	11	久百々
2	竜串	7	大浜	12	鍵掛
3	三崎	8	松尾	13	大川内
4	加久見	9	以布利	14	下ノ加江
5	清水	10	大岐	15	布

ボーリング柱状図(暫定版)

観測点名：土佐清水(とさしみず)
 所在地：高知県土佐清水市浦尻4番1号
 緯度：32° 46' 34.6"
 孔口標高：+3m

観測点コード：KOCH08
 経度：132° 58' 27.5"
 総掘進長：103.00m



NIED 独立行政法人防災科学技術研究所
 Copyright (c) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. All rights Reserved.

図 3-2 土佐清水市浦尻ボーリング柱状図

表 3-2 工学の基盤地震動（内陸型）

内陸地震	観測点	成分	最大加速度 (cm/s ²)
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	357
		EW	574
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	412
		EW	312
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	430
		EW	159
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	158
		EW	242
	豊野	NS	127
		EW	153

表 3-3 工学の基盤地震動（海溝型）

海溝型地震	観測点	成分	最大加速度 (cm/s ²)
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	52
		EW	102
	白糠南	NS	146
		EW	145
	静内	NS	54
		EW	83
	大樹	NS	103
		EW	127
	豊頃	NS	155
		EW	137
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼 (宮城県)	NS	208
		EW	137
	女川 (東北電力)	NS	419
		EW	408
	いわき (福島県)	NS	118
		EW	122
	福島F1_GN5 (東京電力)	NS	230
	福島F1_GS5 (東京電力)	EW	105
	福島F1_GS5 (東京電力)	NS	242
	福島F1_GS5 (東京電力)	EW	154
	福島F2_FF4 (東京電力)	NS	205
	福島F2_FF4 (東京電力)	EW	161
	東海第二_GRO1 (日本原電)	NS	301
東海第二_GRO1 (日本原電)	EW	233	

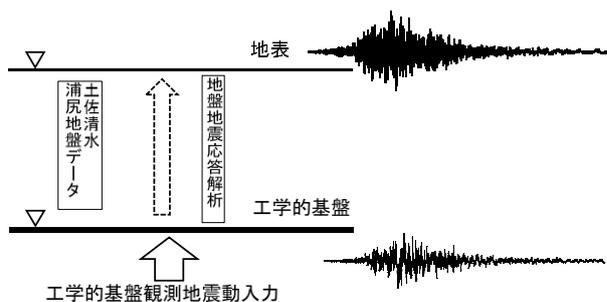


図 3-3 地表強震動作成方法

表 3-4 土佐清水市・浦尻地盤データ (KOCH08、Kik-net)

No	Thickness	Depth	Vp	Vs	減衰
	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	(%)
1	2.0	2.0	400	170	5
2	1.0	3.0	1000	170	5
3	1.0	4.0	1000	520	5
4	3.0	7.0	1800	520	5
5	5.0	12.0	2050	660	5
6	5.0	17.0	2050	850	5
7	7.0	24.0	3600	1180	5
8	9.0	33.0	3600	1300	5
9	12.0	45.0	3300	1680	5
10	17.0	62.0	3600	1680	5
11	—	—	3900	2050	5

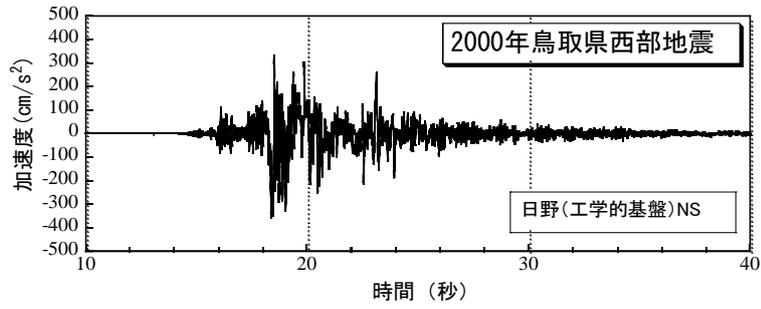


図 3-4 日野 NS 工学の基盤地震動

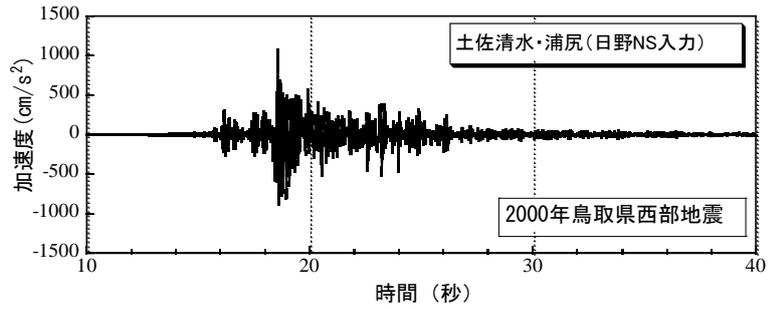


図 3-5 浦尻地表強震動（日野 NS 工学の基盤地震動）

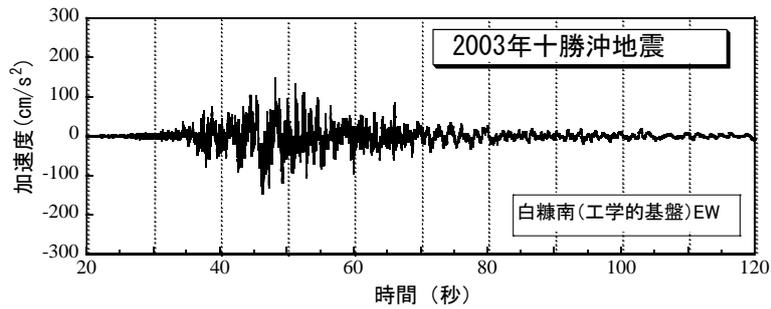


図 3-6 白糠 EW 工学の基盤地震動

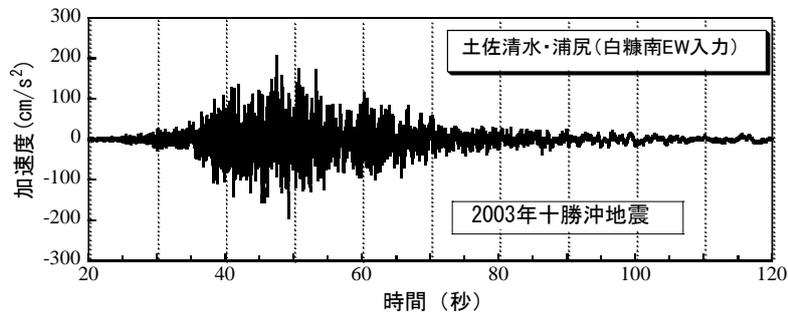


図 3-7 浦尻地表強震動（白糠 EW 工学の基盤地震動）

3.2 作成した地表強震動の周期特性

2000年鳥取県西部地震の日野NS（工学的基盤地震動）及び2003年十勝沖地震の白糠南EW（工学的基盤地震動）から作成した図3-5及び図3-7に示した地表強震動の速度応答スペクトルを図3-8に示す。hは減衰定数を示す。日野NSでは周期0.1秒付近に卓越周期があり、白糠南EWでは周期3.5秒付近に卓越周期がある。いずれもこれらの卓越周期では、速度応答量Svが100cm/sを超える速度応答量となっている。

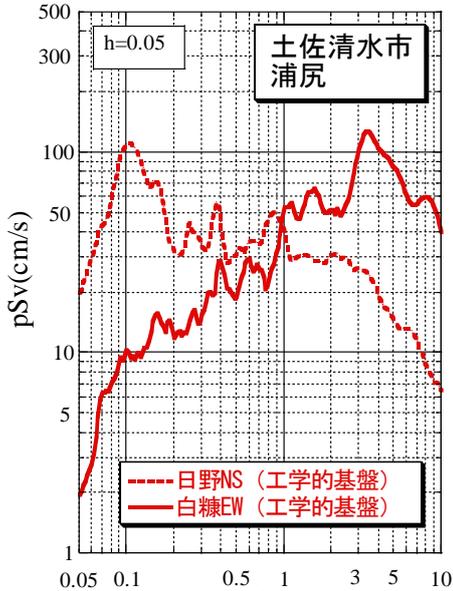


図3-8 速度応答スペクトル
(浦尻地表・日野NS、白糠EW)

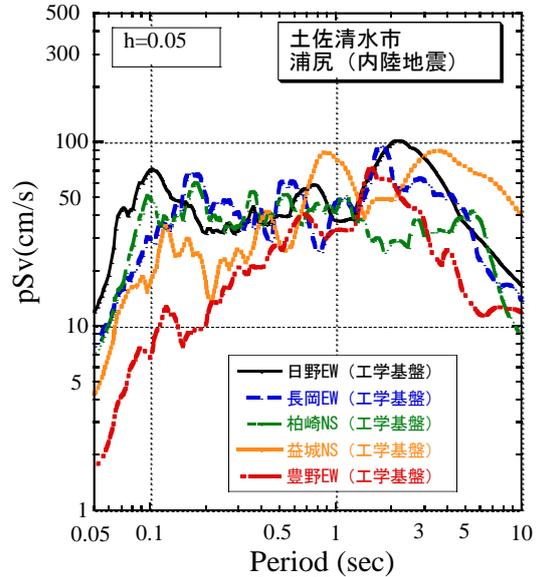


図3-9 速度応答スペクトル
(浦尻地表・内陸地震)

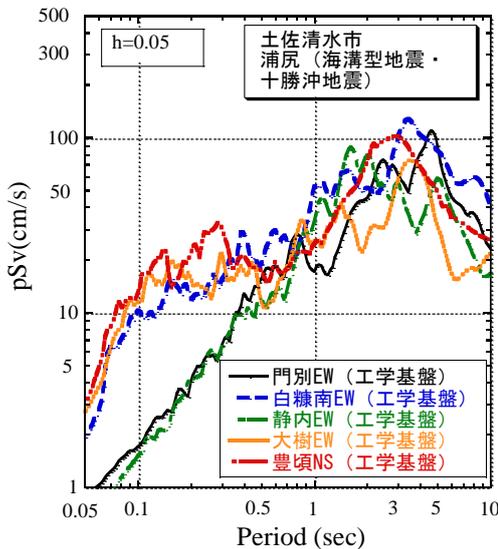


図3-10 速度応答スペクトル
(浦尻地表・十勝沖地震)

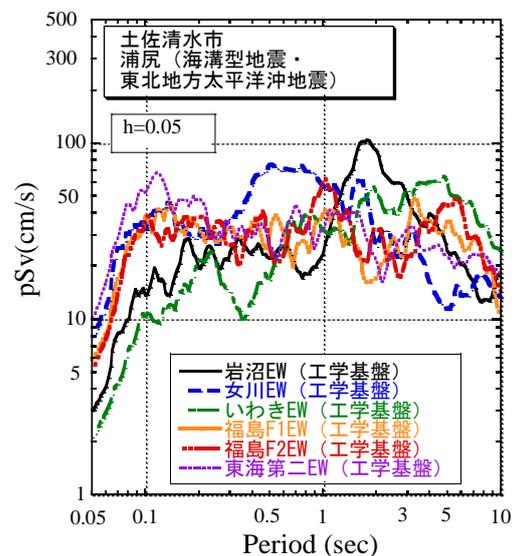


図3-11 速度応答スペクトル
(浦尻地表・東北地方太平洋沖地震)

図 3-9 には内陸地震の表 3-2 の工学的基盤地震動から作成した地表強震動の速度応答スペクトルを、図 3-10 及び図 3-11 では表 3-3 の 2003 年十勝沖地震及び 2011 年東北地方太平洋沖地震の工学的基盤地震動から作成した地表強震動の速度応答スペクトルを示す。

図 3-9 の速度応答スペクトルは、図 3-8 の日野 NS（工学的基盤）と同じく周期 0.1 秒付近において速度応答量が大きくなっている作成地表強震動が多く見られる。また周期 1.5 秒～3 秒にかけて速度応答量が大きくなっている。図 3-10 及び図 3-11 では、周期 1.5 秒～4 秒にかけて速度応答量が大きくなっている。図 3-11 の東北地方太平洋沖地震の工学的基盤地震動を用いた場合には、図 3-9 と同じく周期 0.1 秒付近についても速度応答量が大きくなり、図 3-10 の十勝沖地震の工学的基盤地震動を用いた場合と比較すると、同じ海溝型地震によっても周期特性は異なっている。

3.3 強震記録を用いた表層地盤特性

Kik-net の土佐清水市の清水地区浦尻エリア (KOCH08) において、2000 年以降の 10cm/s^2 以上の加速度記録 16 個の H/V スペクトル図を図 3-12 に示す。これら 16 個の加速度記録を使用している。この 16 個の土佐清水市浦尻観測地点から震源までの震央距離は $31\text{km} \sim 111\text{km}$ である。

H/V スペクトルの算出は、観測地震動の 3 成分をそれぞれフーリエ変換し、ウィンドウ幅 0.2Hz の Parzen Window により平滑化する。平滑化したフーリエスペクトルの NS 方向、EW 方向を UD 方向で除して、H/V スペクトルを求めた。得られた 16 個の H/V スペクトルの平均値を求め、図 3-12 には示している。

図 3-12 の土佐清水市・浦尻地区 (KOCH08) の H/V スペクトルから、NS 方向及び EW 方向共に、周期 0.1 秒以下、若しくは 0.1 秒をやや上回る周期帯域に卓越周期があることがわかる。

H/V スペクトルの卓越周期は、地震時の対象地盤となる S 波増幅の卓越周期と考えられる。先に示した図 3-8（内陸地震・日野 NS）及び図 3-9（内陸地震・5 波）において、周期 0.1 秒付近において速度応答スペクトルが大きくなる傾向にあった。

図 3-8（海溝型地震・白糠南 EW）、図 3-10（海溝型地震 1）及び図 3-11（海溝型地震 2）では、周期 2 秒から周期 5 秒付近において卓越する周期帯域となっている。この周期帯域は、図 3-12 の H/V スペクトルにおいて、卓越する周期帯域ではない。そのため、周期 2 秒から周期 5 秒付近において卓越する場合は、土佐清水市・浦尻地区 (KOCH08) の表層地盤の影響ではなく、地震の震源や規模による影響があると考えられる。

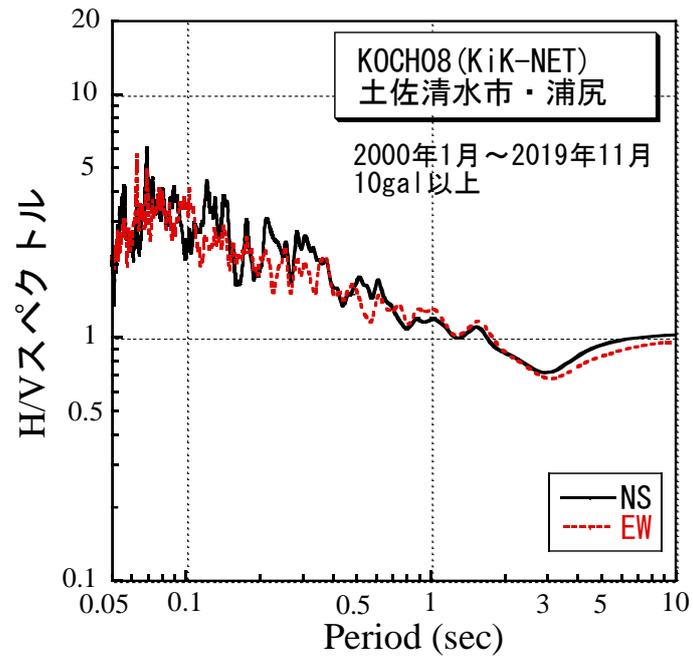


図 3-12 土佐清水市浦尻 H/V スペクトル

第4章 土佐清水市の建物の分布状況

地震による建物被害対策においては建物の建設年は重要な指標となる。また土佐清水市は人口減少が進んでいる地域で、空き家率が高いという問題を抱えている。空き家は人が住んでいる家と比べて人による手入れがされず、虫害や雨漏り等により傷みやすくなるという特徴がある。これより、建物の建設年とともにその建物が空き家である場合、傷み具合などが地震の建物被害の対策において、重要な影響を及ぼす可能性がある。

そこで本研究では、土佐清水市から提供して頂いた建物の建設年情報と現地調査によって得た空き家の情報を活用して、地震建物被害を考察していく。

4.1 土佐清水市全体の建物建設年

土佐清水市市役所より提供して頂いた建物の建設年データをもとに、建物の築年数を3つに分け、それぞれの建物の分布を調べた。今年度は土佐清水市全体の80%以上の建物の建設年データをGISに入力し、土佐清水市全域の建物の建設年分布を把握することが可能となった。図4-5から図4-29にGISによる建物の建設年分布を示す。また、土佐清水市を大きく図4-1のようにエリア分けし、図4-2～図4-4にそのエリアの地域名称を示す。

(1) 建設年代について

3種類の築年数の採用について以下に示す。

特に住宅の耐震基準の変更があった建築基準法に応じて分類を行った。

① 1981年以前

旧耐震基準にあたる時代

1981年改正建築基準法の新耐震基準以前の耐震性を有する建物

② 1981年～1999年

1978年宮城県沖地震の建物の地震被害を受けて1981年に改正

この改正以降の建物は新耐震基準である。具体的には建物の強度に関して次のような基準がある。

- 1) 震度6強から7に達する大規模地震で倒壊・崩壊しないこと
- 2) 震度5強程度の中規模地震ではほとんど損傷しないこと

③ 2000年以降

2000年以降においては、新耐震基準よりさらに強化するバランスの良い家づくりが義務化され、木造住宅への耐震基準に大きな変更点を加えられた。大きな変更点としては次のような基準がある。

- 1) 地盤に応じた基礎の設計
- 2) 接合部に金具取り付け
- 3) 偏りのない耐力壁の配置

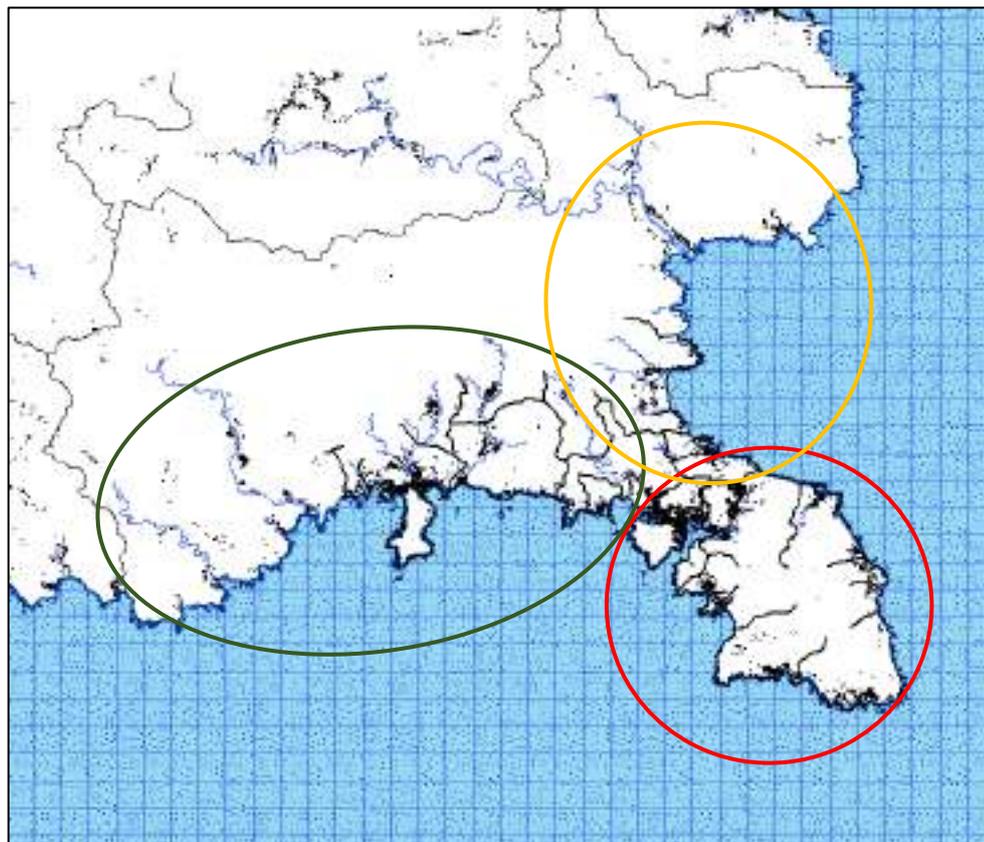


図 4-1 土佐清水市地図エリア分け



图 4-2 清水地区、半島地区周辺地図

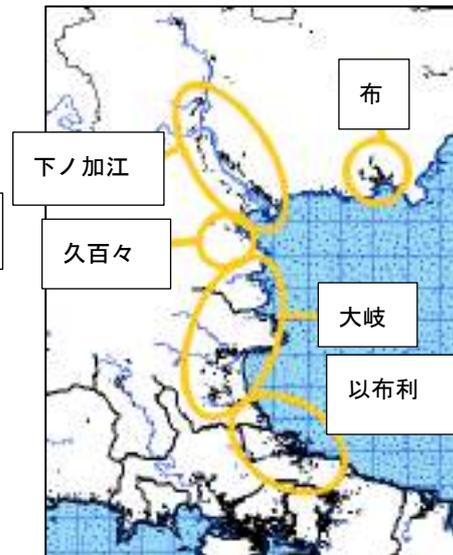


图 4-3 清水地区より北のエリア地図

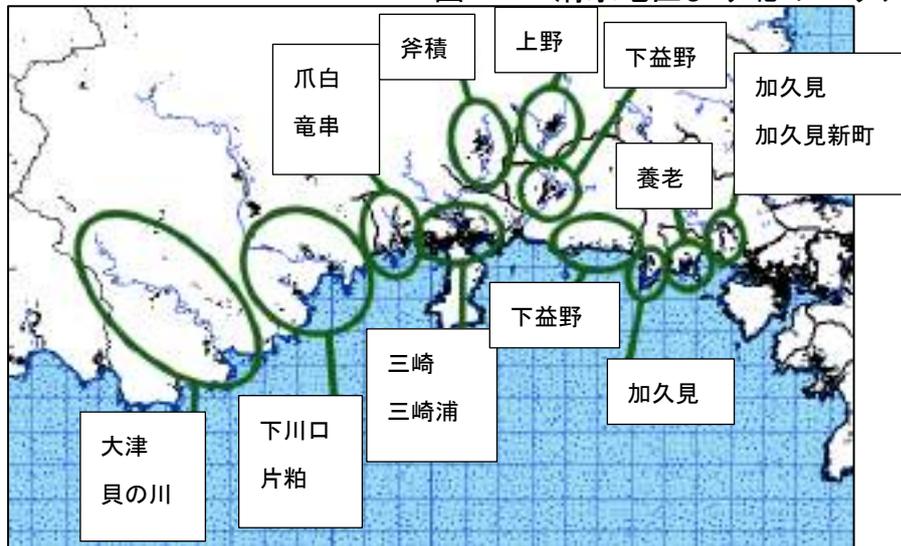


图 4-4 清水地区より西のエリア地図

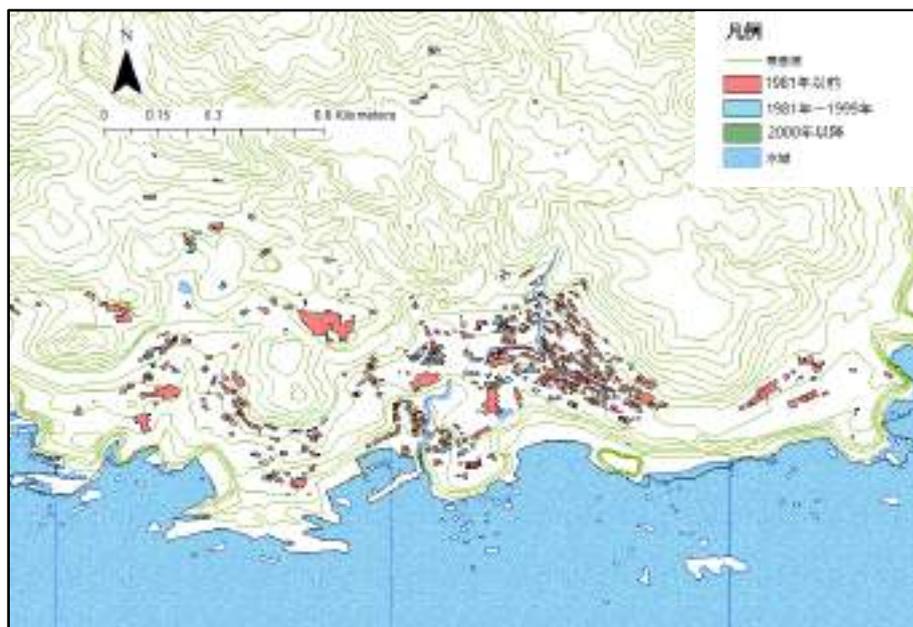


图 4-5 建物分布(足摺岬)

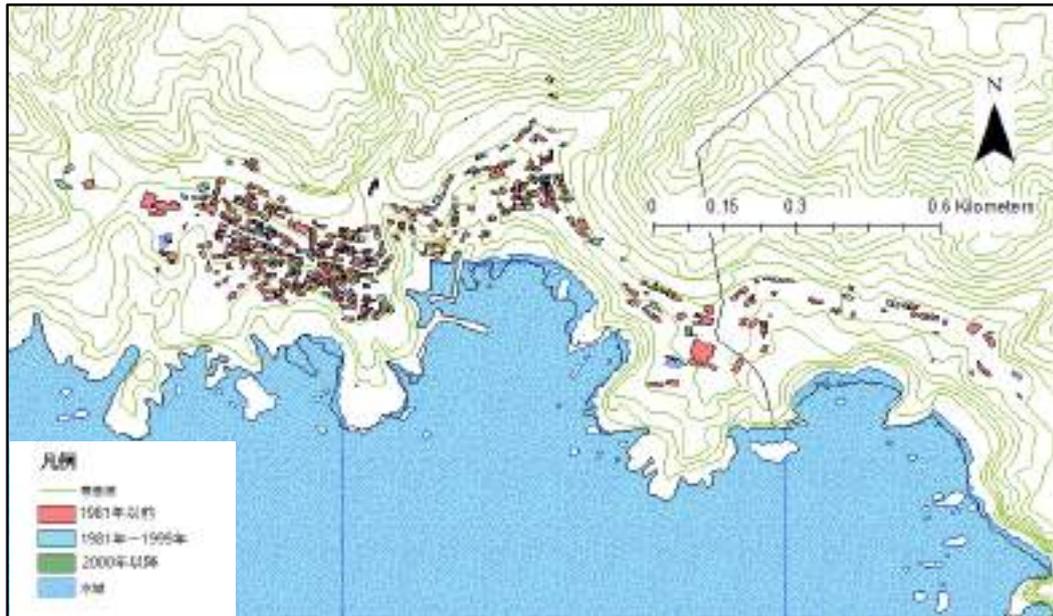


图 4-6 建物分布(松尾)

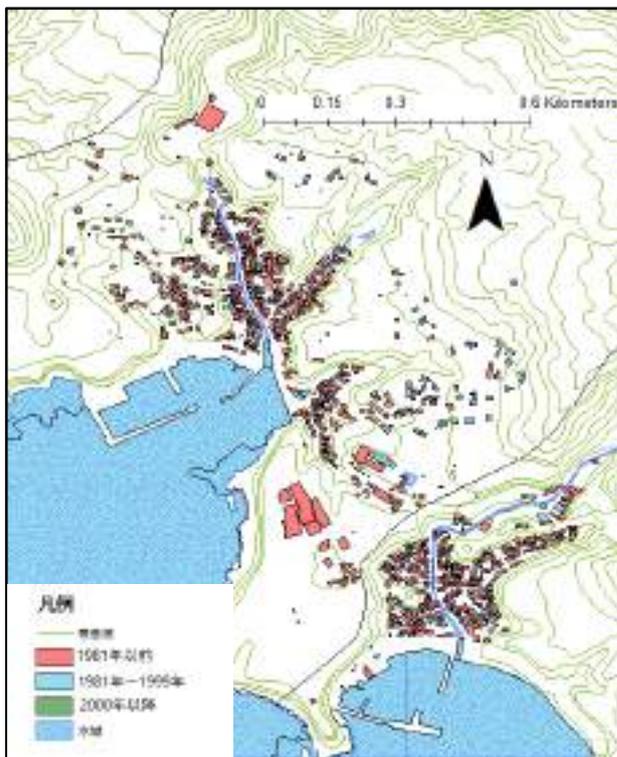


图 4-7 建物分布(中浜・大浜)

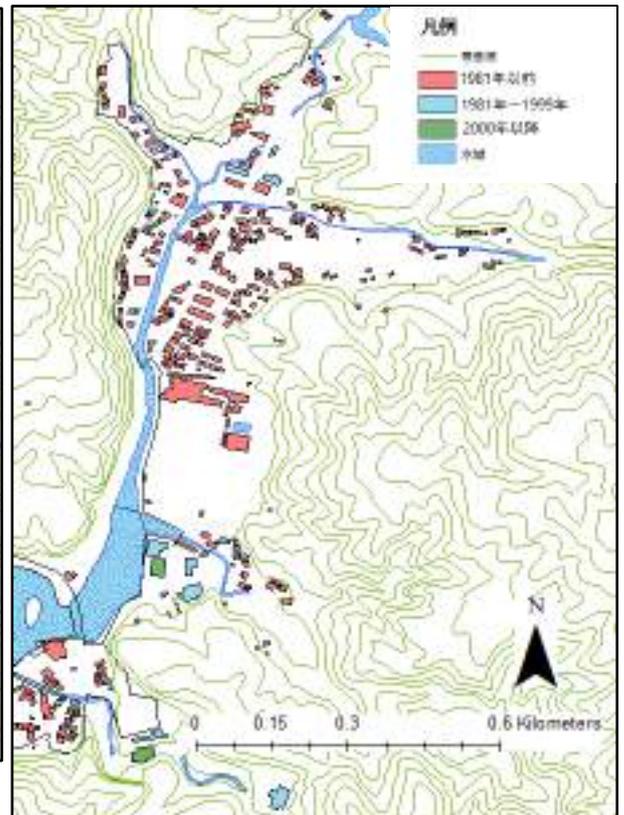


图 4-8 建物分布(浦尻)



图 4-9 建物分布(津呂)

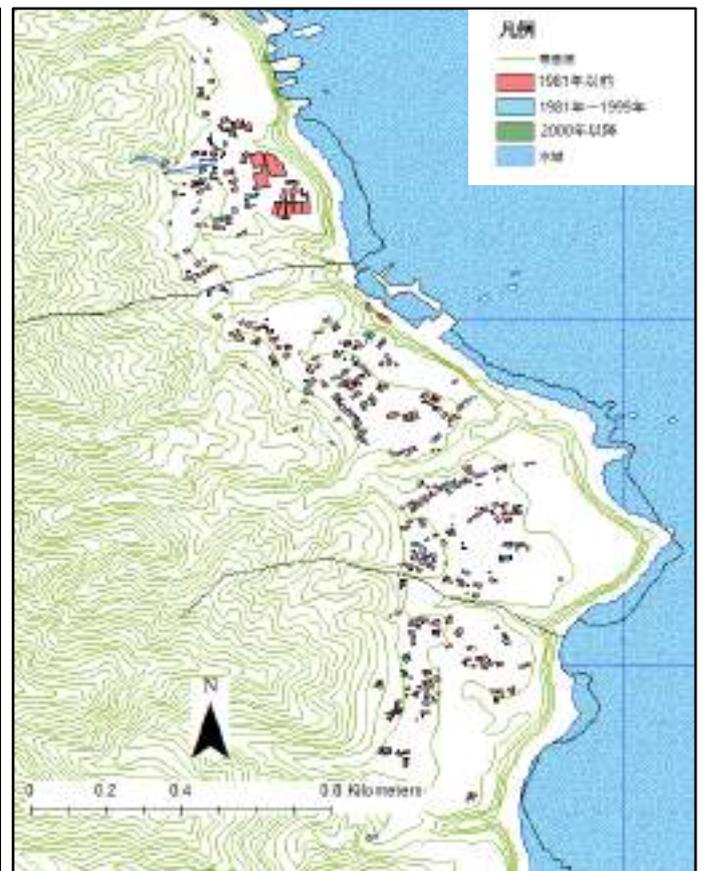


图 4-10 建物分布(窪津 1)

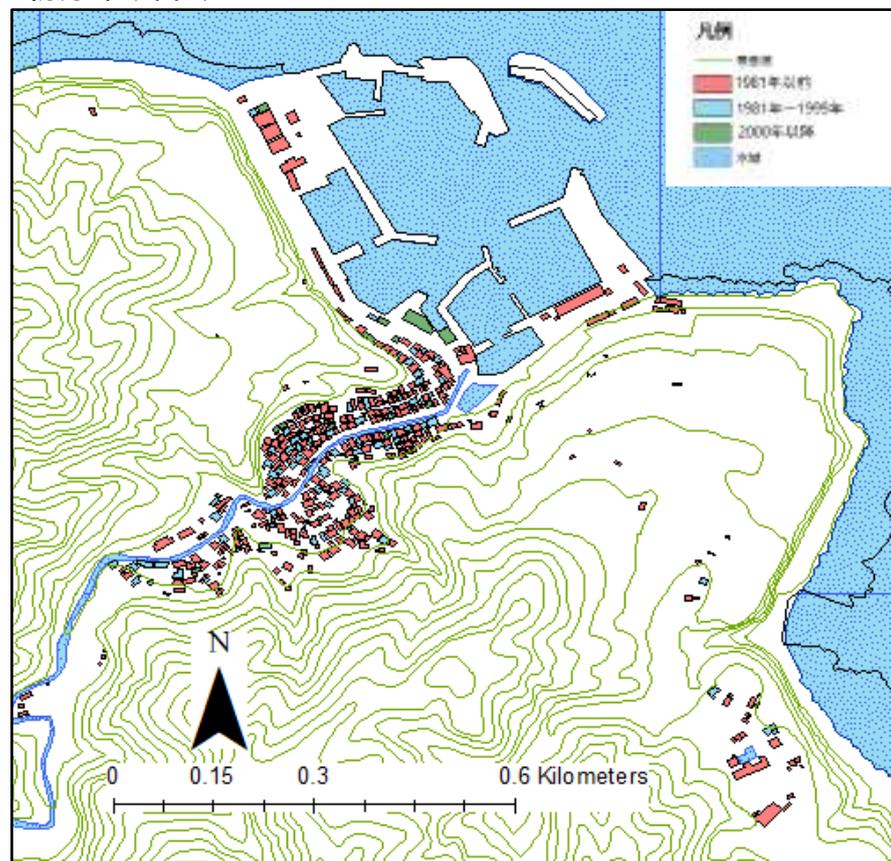


图 4-11 建物分布(窪津 2)

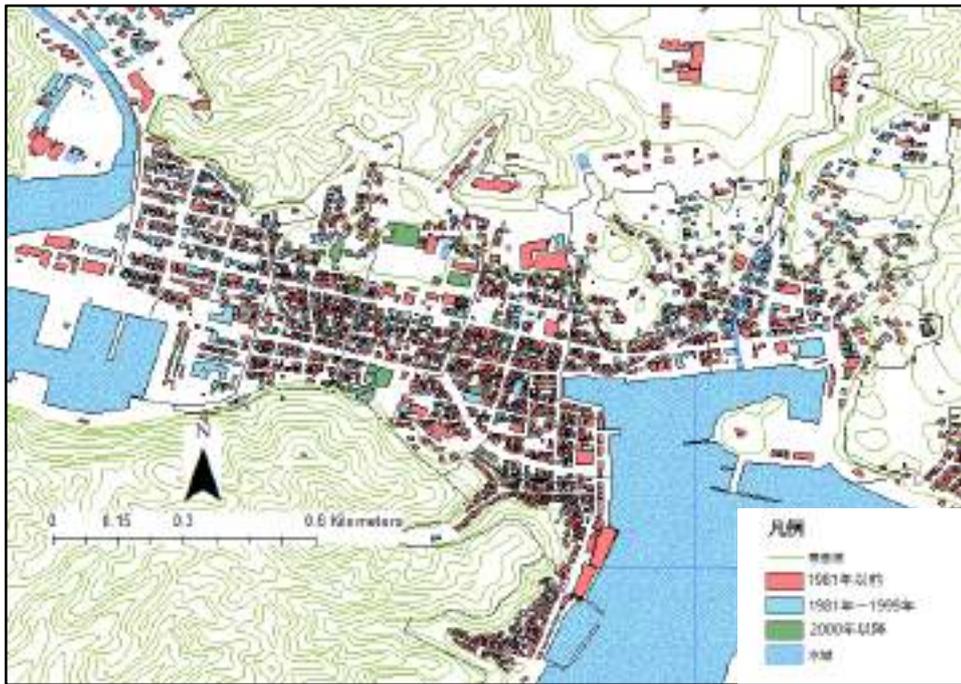


图 4-12 建物分布(清水地区)

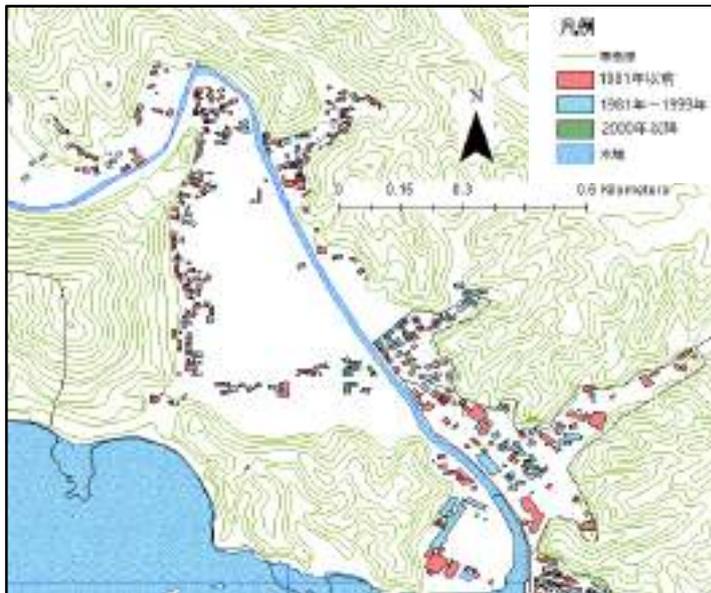


图 4-13 建物分布(加久見 1・加久見新町)

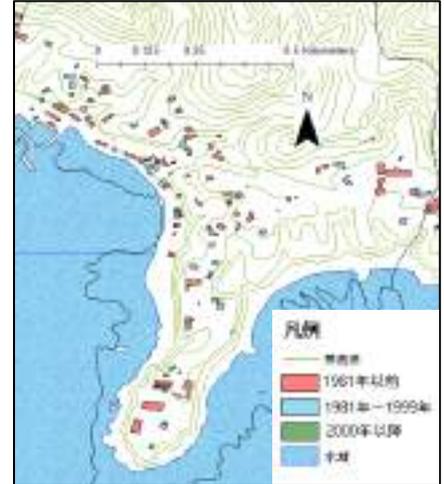


图 4-14 建物分布(加久見 2)

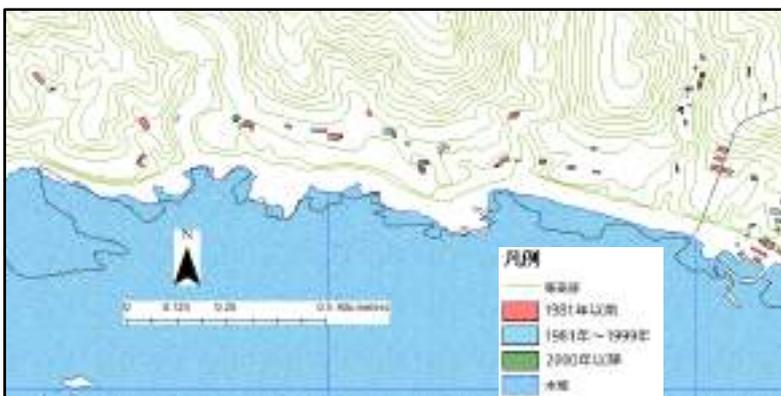


图 4-15 建物分布(下益野 1)

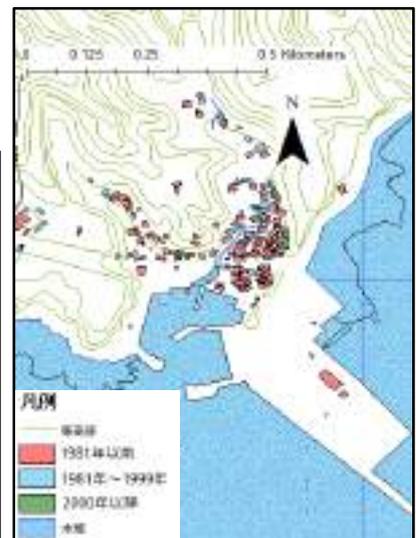


图 4-16 建物分布(養老)



图 4-17 建物分布(上野)

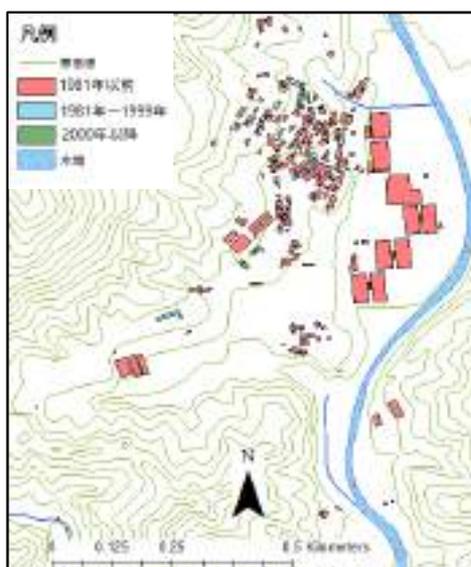


图 4-18 建物分布(斧積)



图 4-19 建物分布(下益野 2)

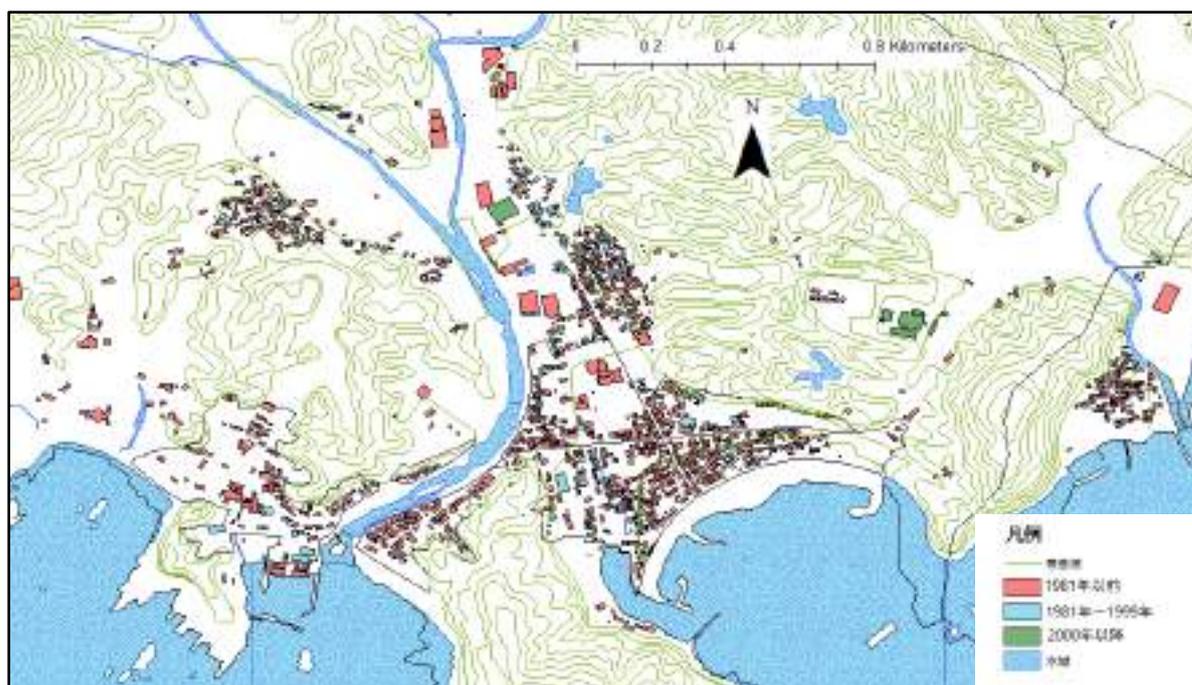


图 4-20 建物分布(三崎・三崎浦)

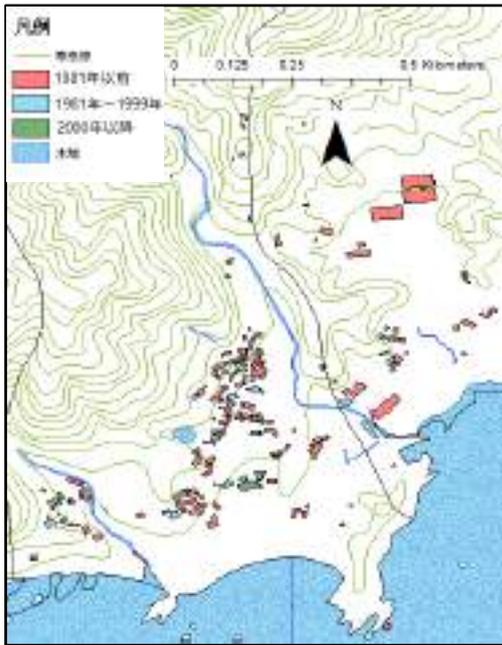


图 4-21 建物分布(爪白)



图 4-22 建物分布(下川口・片粕)

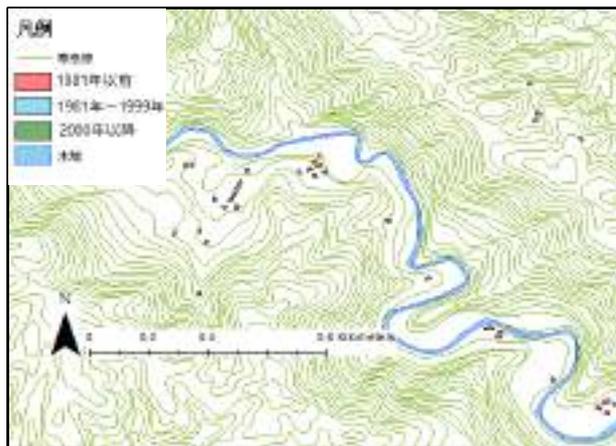


图 4-23 建物分布(大津 1)

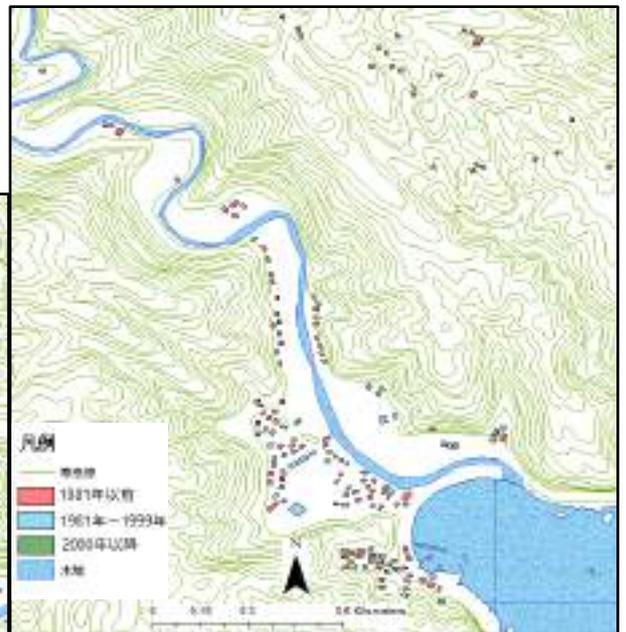


图 4-24 建物分布(大津 2)



图 4-25 建物分布(以布利)



图 4-26 建物分布(大岐 1)



図 4-27 建物分布(大岐 2)

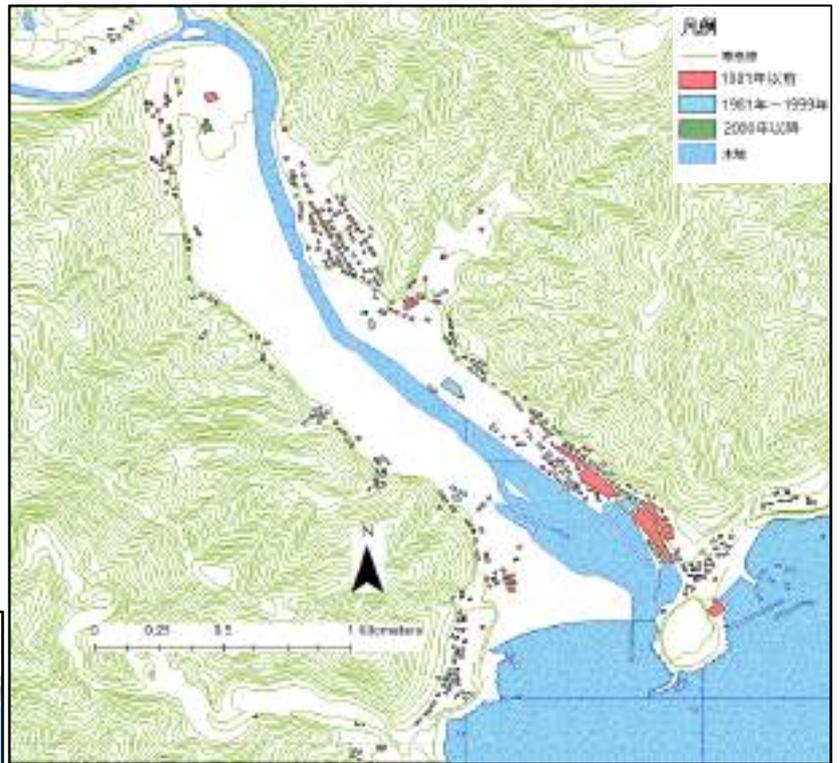


図 4-28 建物分布(下ノ加江)

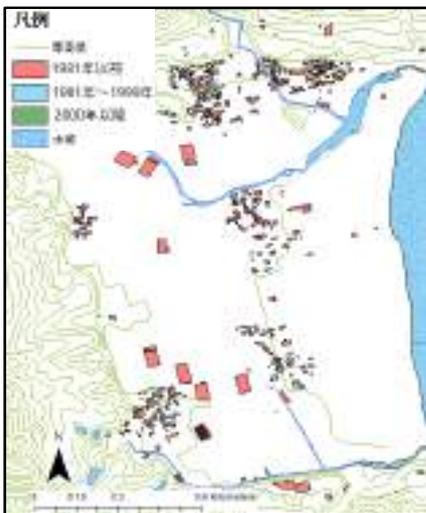


図 4-29 建物分布(大岐 3)

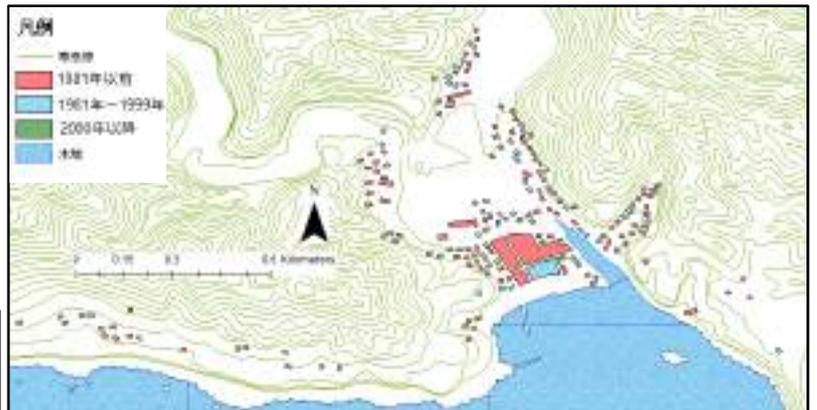


図 4-31 建物分布(布)



図 4-30 建物分布(久百々)

図 4-5 から図 4-31 を通して土佐清水市は全体的に赤色で表記される 1981 年以前の古い建物が多い。また狭い低地の平地に建物が集中し、図 4-28 の下ノ加江エリアのように川に沿って建物が並んでいる場所も多くみられた。

4.2 空き家について

本研究では空き家は現地調査を行うことで状況を把握していく。

4.2.1 全国的な空き家の現状⁵⁾

近年全国的に人口減少や高齢化、既存の建築物の老朽化、社会ニーズの変化等に伴って、居住されていない空き家が年々増加している。

空き家は適切に管理が行われていないものが多く、こうした空き家が防災、衛生、景観等の地域住民の生活環境に悪影響を及ぼしており、このようなことから平成27年5月に「空家等対策の推進に関する特別措置法」が完全施工されている。このように全国的にも地域による空き家の対策が注目されている。

適切な管理がされていない空き家によって引き起こされる諸問題を以下に示す。

(1) 防災性の低下

- ・ 倒壊、崩壊、屋根や外壁の落下、火災発生の恐れ
- ・ 強風による瓦礫等の飛散

(2) 防犯性の低下

- ・ 不法侵入や非行、犯罪の温床となる恐れ

(3) 衛生の悪化、悪臭の発生

- ・ 害虫、害獣の発生や集中
- ・ ごみの不法投棄
- ・ ごみの不法投棄や害獣の集中による悪臭の発生

(4) 風景・景観の悪化

- ・ 倒壊した家屋の放置や敷地の管理不全等による風景や景観の悪化

(5) 敷地の管理不全

- ・ 樹枝の越境、雑草の繁茂、落ち葉の飛散

(6) その他

- ・ 住宅地としてコミュニティ機能の低下

4.2.2 土佐清水市の空き家の状況

(1) 空き家率

全国および高知県と比較して、土佐清水市の空き家率を表に示す。

表 4-1 空き家率⁶⁾

年	平成10年	平成15年	平成20年	平成25年
土佐清水市	18.1%	18.8%	22.4%	27.8%
高知県	13.2%	14.0%	16.5%	17.7%
全国	11.5%	12.2%	13.1%	13.5%

表 4-1 より、土佐清水市は全国、高知県全体に比べて高い空き家率であり、4 軒に 1 軒が空き家という深刻な状況を抱えている。

(2) 空き家の状況

土佐清水市の空き家の状況を以下に示す。



図 4-32 空き家の様子 1



図 4-33 空き家の様子 2



図 4-34 空き家の様子 3



図 4-35 空き家の様子 4



図 4-36 空き家の様子 5

図 4-32～4-36 を見て分かるように、人の手入れが行き届いていないことにより今にも崩れそうな建物も見受けられ、建設年だけでは地震建物被害を考察しきれないと判断できる。

4.2.3 空き家の特徴

その建物が空き家であるかを見極めるのはとても難しい。そこで本研究では数回の現地調査によって、分かってきた空き家の特徴をもとに、空き家を特定していくことにした。空き家の特徴を以下に示す。

- ・郵便受けにチラシやダイレクトメールが大量にたまっている
- ・窓ガラスが割れたまま
- ・カーテンがない
- ・家具がない
- ・門から玄関まで草が生えていて出入りしている様子がうかがえない
- ・売り・貸し物件の表示がある
- ・上記以外（電気メーターが動いていない等）

4.2.4 空き家の不良の程度のランク分け

現地調査により発見した空き家の不良の程度を1、2、3とランク分けしていく。ランク分けには高知市で実際の空き家の不良度をランク分けする際に用いられる表4-2『空家等「調査票」兼不良度判定票』⁷⁾を参考とした。

本研究では目視による判断を行うため、表4-2の中から、外壁の仕上げ材料、柱の傾斜、屋根の変形に注目し判定した。

ランク1は比較的いい状態の空き家(人が住んでいる家と変わらない綺麗な状態)、ランク2は悪い状態の空き家(人の気配がなく荒れている、いくらかの損傷が見られる状態)、ランク3はとても悪い状態の空き家(今にも崩れそうな状態)とした。

表4-2『空家等「調査票」兼不良度判定表』

評価区分	評価項目	評価内容
構造一般の程度	①基礎	構造耐力上主要な部分である基礎が確認できるもの
		構造耐力上主要である基礎が玉石であるもの
		構造耐力上主要な部分である基礎がないもの
	②外壁	外壁の構造が粗悪でないもの
外壁の構造が粗悪なもの		
構造の腐朽又は破損の程度	③基礎、土台、柱、又は梁	柱の傾斜がなく、土台又は柱も破損や腐朽等がないもの
		柱が傾斜しているもの、土台又は柱が腐朽し、又は破損しているもの等小修理を要するもの
		基礎に不同沈下があるもの、柱の傾斜が著しいもの、はりが腐朽し、又は破損しているもの、土台又は柱の数か所に腐朽又は破損があるもの等大修理を要するもの
		基礎、土台、柱又ははりの腐朽、破損又は変形が著しく破壊の危険のあるもの
	④外壁	外壁の仕上材料の剥落、腐朽又は破損がなく、下地の露出していないもの
		外壁の仕上材料の剥落、腐朽又は破損により、下地の露出しているもの
		外壁の仕上材料の剥落、腐朽又は破損により、著しく下地の露出しているものは又は壁体を貫通する穴を生じているもの
	⑤屋根	屋根ぶき材料の一部に剥落又はずれがないもの
		屋根ぶき材料の一部に剥落又はずれがあり、雨もりのあるもの
		屋根ぶき材料に著しい剥落があるもの、軒の裏板、たる気等が腐朽したもの又は軒のたれ下がったもの
屋根が著しく変形したもの		
防火上又は避難上の構造の程度	⑥外壁	延焼の恐れのある外壁がないもの
		延焼の恐れのある外壁があるもの
		延焼の恐れのある外壁の壁面数が3以上あるもの
	⑦屋根	屋根が不燃性材料でふかれているもの
		屋根が可燃性材料でふかれているもの
排水設備	⑧雨水	雨樋があるもの
		雨樋がないもの

4.3 空き家の分布（調査地区の現地調査）

本研究では空き家の分布およびその空き家の不良度を調べるために空き家の現地調査を行った。調査地区は清水地区と足摺岬エリアである。空き家分布の様子をGISを用いて図4-37および図3-38に示す。ランク1の空き家を黄色、ランク2の空き家をオレンジ色、ランク3の空き家を赤色とした。

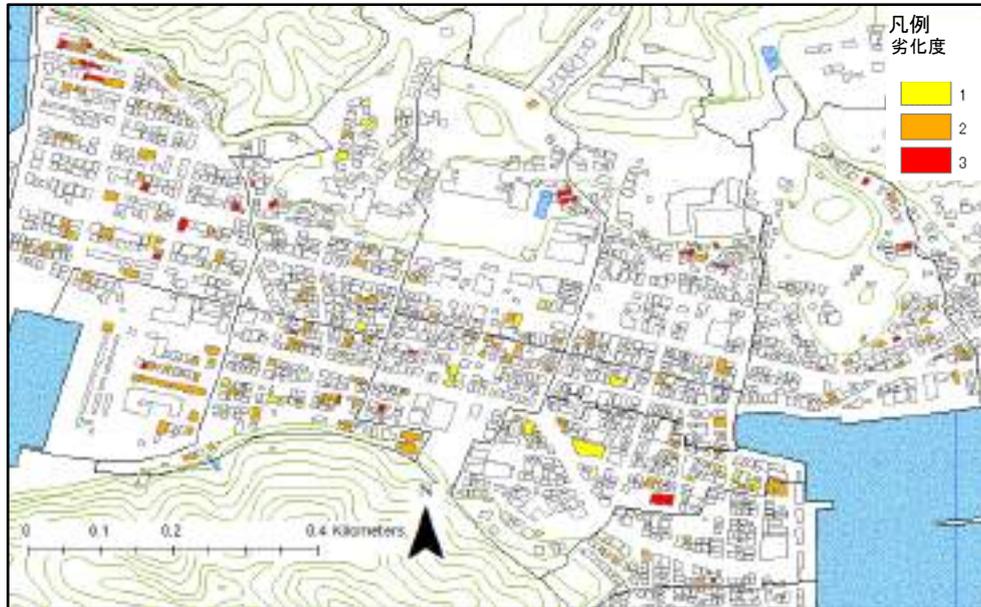


図 4-37 清水地区空き家分布

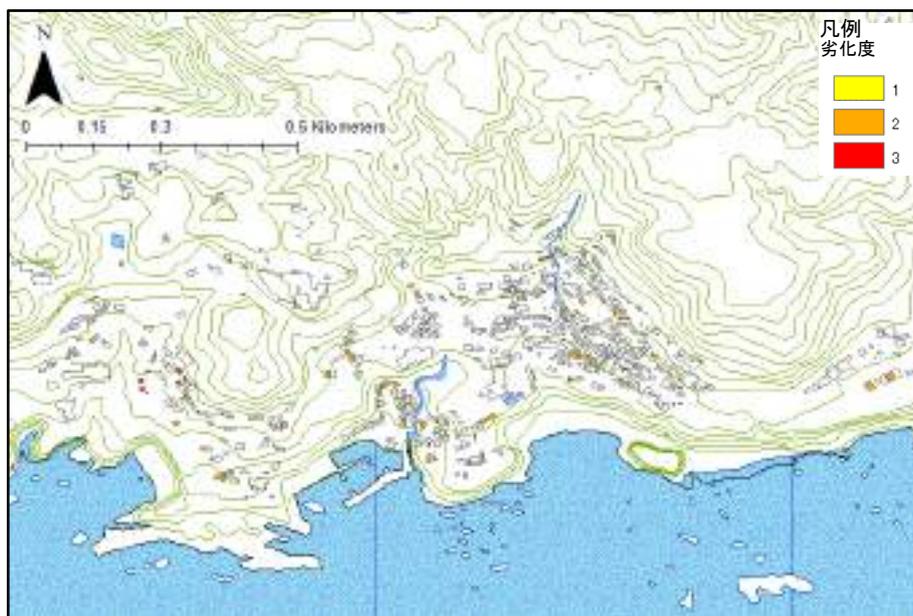


図 4-38 足摺岬エリア空き家分布

図 4-37、図 4-38 より清水地区、足摺岬エリアともに多くの空き家が確認できる。空き家の状況はランク 2 で表される悪い状態のものが多い。

第5章 空き家の耐震性低下を考慮した木造住宅の地震応答解析

5.1 木造住宅の解析モデル

本研究で用いた解析振動モデルは図5-1に示す2質点せん断系モデルである。木造住宅の重量 W や固有周期は熊本地震で住宅の被害を受けた2階建て住宅を用いた。

木造住宅の復元力特性は、バイリニアール・スリップモデルの復元力特性を採用し、減衰定数 h は5%で解析を行った。木造住宅では、経年劣化による復元力特性の低下が起こると報告されている。よって、本研究では初期剛性 K_1 を変化させることで木造住宅の経年劣化を考慮した。本研究では建物の1階応答変位を求めるため、1階の初期剛性に注目する。表5-1に示すように新しい建物になるにつれて1階の K_1 を大きくし剛性を向上させている。空き家の場合も表5-2に示すようにランクが上がる(状態が悪くなる)につれて1階の K_1 を小さくし剛性を低下させている。

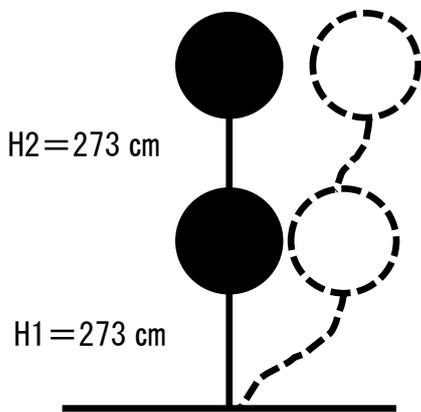


図5-1 2質点せん断系モデル

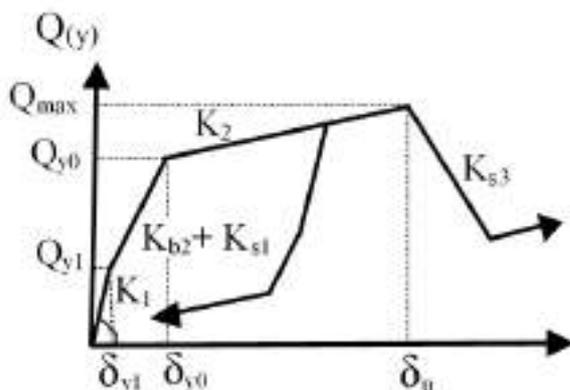


図5-2 バイリニアール・スリップモデル

表5-1 解析に用いた諸定数(建設年考慮)

	1981年以前	1981年以降	2000年以降
W1 (ton)	14.51	15.85	14.51
W2 (ton)	5.15	4.49	5.15
固有周期 (s)	0.404	0.372	0.303
K1 (1階) (ton/cm)	0.55	0.64	1.061
K1 (2階) (ton/cm)	0.314	0.414	0.393

表5-2 解析に用いた諸定数(空き家劣化考慮)

	ランク1	ランク2	ランク3
W1 (ton)	36.83		
W2 (ton)	13.37		
固有周期 (s)	0.611	0.715	0.864
K1 (1階) (ton/cm)	0.697	0.433	0.36
K1 (2階) (ton/cm)	0.264	0.339	0.14

5.2 土佐清水市の表層地盤の増幅特性をふまえた、建物の経年劣化および空き家の耐震性低下を考慮した木造住宅の地震応答解析

本研究では工学的基盤地震動より作成した土佐清水市の15地点の地表強震動を用いて建物の経年劣化を考慮した地震応答解析を行う。また、清水地区と松尾エリアは空き家の耐震性低下を考慮した地震応答解析も行った。木造住宅の1階地震応答変位を表5-3から表5-36に示す。

表 5-3 地震応答変位 (cm)
(下川口・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	4.607	3.952	2.003
		EW	4.275	3.936	2.764
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	6.135	4.82	2.874
		EW	7.143	7.936	5.676
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	2.416	2.492	1.853
		EW	4.284	3.72	3.259
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	3.62	3.488	1.817
		EW	3.975	3.053	1.517
	豊野	NS	2.098	2.002	0.995
		EW	2.222	1.843	1.134

表 5-5 地震応答変位 (cm)
(竜串・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	5.137	4.588	2.424
		EW	4.081	4.477	3.044
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	7.046	5.752	3.163
		EW	6.705	7.258	5.367
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	7.011	6.735	3.767
		EW	7.874	8.221	5.734
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	4.199	4.322	2.468
		EW	4.261	3.07	2.001
	豊野	NS	2.583	2.54	1.308
		EW	2.601	2.218	1.322

表 5-4 地震応答変位 (cm)
(下川口・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.687	0.735	0.461
		EW	0.992	0.684	0.386
	白糠南	NS	1.443	1.316	0.705
		EW	2.275	1.586	0.922
	静内	NS	0.621	0.504	0.291
		EW	0.806	0.577	0.397
	大樹	NS	1.263	1.089	0.763
		EW	1.35	1.377	0.922
	豊頃	NS	1.814	1.654	1.488
		EW	1.705	1.633	1.493
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	2.913	2.603	1.139
	(宮城県)	EW	2.548	2.368	1.02
	女川	NS	10.545	9.968	4.576
	(東北電力)	EW	2.049	1.724	1.146
	いわき	NS	1.936	2.003	1.561
	(福島県)	EW	1.031	1.24	1.111
	福島F1_GN5	NS	2.475	2.625	2.03
	(東京電力)	EW	3.096	2.724	1.702
	福島F1_GS5	NS	2.916	2.969	1.682
	(東京電力)	EW	4.778	3.752	3.729
	福島F2_FF4	NS	3.467	2.401	1.849
	(東京電力)	EW	2.383	1.597	1.209
	東海第二_GR01	NS	3.369	3.745	1.966
	(日本原電)	EW	2.37	1.804	1.097

表 5-6 地震応答変位 (cm)
(竜串・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.782	0.884	0.573
		EW	1.001	0.789	0.45
	白糠南	NS	1.661	1.65	0.839
		EW	2.456	2.289	1.354
	静内	NS	0.753	0.609	0.416
		EW	0.973	0.744	0.454
	大樹	NS	1.57	1.478	0.91
		EW	1.708	1.921	1.269
	豊頃	NS	2.048	2.122	2.144
		EW	2.268	1.899	2.153
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	2.335	2.33	1.993
	(宮城県)	EW	1.838	1.865	1.588
	女川	NS	10.526	10.027	5.703
	(東北電力)	EW	2.271	2.136	1.349
	いわき	NS	1.142	1.409	1.251
	(福島県)	EW	2.218	2.449	1.979
	福島F1_GN5	NS	2.845	3.137	2.901
	(東京電力)	EW	3.463	3.452	2.398
	福島F1_GS5	NS	3.273	3.361	2.555
	(東京電力)	EW	5.066	4.448	4.027
	福島F2_FF4	NS	3.904	2.814	2.285
	(東京電力)	EW	2.684	1.954	1.517
	東海第二_GR01	NS	3.745	4.007	2.668
	(日本原電)	EW	2.5	2.206	1.347

表 5-7 地震応答変位(cm)
(三崎・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	4.132	3.783	1.983
		EW	3.522	3.855	2.526
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	6.688	4.534	2.441
		EW	7.596	6.894	5.278
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	5.459	4.354	2.087
		EW	8.3	8.236	5.039
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	3.63	3.318	1.77
		EW	3.669	3.288	1.909
	豊野	NS	2.236	1.941	0.959
		EW	2.118	1.757	1.111

表 5-9 地震応答変位(cm)
(加久見・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	3.963	3.426	2.432
		EW	3.183	3.511	2.613
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	5.325	4.219	2.599
		EW	6.761	6.497	4.327
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	4.911	4.483	2.13
		EW	6.653	6.763	4.449
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	2.948	2.74	2.061
		EW	3.088	1.915	1.676
	豊野	NS	1.786	1.977	1.103
		EW	1.785	1.586	1.203

表 5-8 地震応答変位(cm)
(三崎・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.669	0.72	0.459
		EW	0.948	0.679	0.38
	白糠南	NS	1.395	1.278	0.691
		EW	2.149	1.488	0.904
	静内	NS	0.601	0.508	0.289
		EW	0.775	0.569	0.391
	大樹	NS	1.221	1.068	0.746
		EW	1.332	1.361	0.918
豊頃	NS	1.718	1.633	1.451	
	EW	1.613	1.591	1.463	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	2.128	1.808	1.408
	(宮城県)	EW	1.508	1.596	0.932
	女川	NS	10.15	9.501	4.209
	(東北電力)	EW	1.881	1.62	1.124
	いわき	NS	0.991	1.236	1.089
	(福島県)	EW	1.866	1.961	1.528
	福島F1_GN5	NS	2.378	2.532	1.994
	(東京電力)	EW	2.916	2.562	1.696
	福島F1_GS5	NS	2.872	2.907	1.601
	(東京電力)	EW	4.533	3.518	3.539
	福島F2_FF4	NS	3.26	2.306	1.808
	(東京電力)	EW	2.227	1.515	1.175
	東海第二_GRO1	NS	3.203	3.143	1.89
(日本原電)	EW	2.358	1.712	1.097	

表 5-10 地震応答変位(cm)
(加久見・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.704	0.699	0.61
		EW	0.7	0.732	0.507
	白糠南	NS	1.285	1.318	0.854
		EW	1.723	1.527	1.182
	静内	NS	0.572	0.526	0.458
		EW	0.686	0.558	0.5
	大樹	NS	1.247	1.245	0.916
		EW	1.318	1.461	1.179
豊頃	NS	1.587	1.991	1.948	
	EW	1.544	1.729	1.829	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	1.657	1.953	1.666
	(宮城県)	EW	1.509	1.449	1.183
	女川	NS	9.062	7.463	3.725
	(東北電力)	EW	1.575	1.324	1.298
	いわき	NS	1.02	1.413	1.348
	(福島県)	EW	1.625	1.96	1.851
	福島F1_GN5	NS	2.38	2.344	2.251
	(東京電力)	EW	2.521	2.695	2.324
	福島F1_GS5	NS	2.821	2.565	1.695
	(東京電力)	EW	3.567	3.467	3.181
	福島F2_FF4	NS	2.436	2.219	2.162
	(東京電力)	EW	1.76	1.633	1.339
	東海第二_GRO1	NS	2.52	2.975	2.097
(日本原電)	EW	1.873	1.561	1.422	

表 5-11 地震応答変位(cm)
(浦尻・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	3.535	2.99	1.941
		EW	2.376	2.473	1.914
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	4.755	4.384	2.027
		EW	6.214	5.978	2.61
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	3.522	3.428	1.837
		EW	6.137	6.194	4.038
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	2.277	2.144	1.605
		EW	2.336	1.591	1.432
	豊野	NS	1.537	1.64	0.894
		EW	1.557	1.322	1.093

表 5-13 地震応答変位(cm)
(大浜・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	4.2	3.534	1.741
		EW	3.191	2.734	1.946
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	5.325	4.727	2.125
		EW	5.325	4.727	2.125
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	4.13	4.023	1.879
		EW	9.549	8.701	4.574
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	2.856	2.135	1.587
		EW	6.094	2.107	1.514
	豊野	NS	1.402	1.464	1.093
		EW	1.529	1.345	1.152

表 5-12 地震応答変位(cm)
(浦尻・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.55	0.599	0.476
		EW	0.65	0.639	0.417
	白糠南	NS	1.12	1.061	0.714
		EW	1.487	1.268	0.869
	静内	NS	0.548	0.498	0.326
		EW	0.64	0.479	0.409
	大樹	NS	1.046	0.991	0.821
		EW	1.169	1.175	0.957
	豊頃	NS	1.335	1.603	1.519
		EW	1.287	1.431	1.333
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	1.497	1.571	1.26
	(宮城県)	EW	1.29	1.232	0.925
	女川	NS	7.714	6.332	2.566
	(東北電力)	EW	1.329	1.266	1.255
	いわき	NS	0.82	1.186	1.114
	(福島県)	EW	1.417	1.659	1.495
	福島F1_GN5	NS	2.819	2.913	2.669
	(東京電力)	EW	2.114	2.078	1.75
	福島F1_GS5	NS	2.497	2.082	1.181
	(東京電力)	EW	2.114	2.078	1.75
	福島F2_FF4	NS	2.948	2.653	2.136
	(東京電力)	EW	1.496	1.277	1.03
	東海第二_GRO1	NS	2.277	2.317	1.697
	(日本原電)	EW	1.655	1.328	1.104

表 5-14 地震応答変位(cm)
(大浜・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.598	0.655	0.457
		EW	0.761	0.633	0.435
	白糠南	NS	1.164	0.969	0.719
		EW	1.461	1.212	0.855
	静内	NS	0.518	0.436	0.338
		EW	0.69	0.585	0.455
	大樹	NS	0.919	0.858	0.737
		EW	1.142	1.232	0.945
	豊頃	NS	1.286	1.628	1.282
		EW	1.363	1.529	1.31
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	1.408	1.46	1.209
	(宮城県)	EW	1.227	1.091	0.844
	女川	NS	11.372	9.145	3.312
	(東北電力)	EW	1.784	1.272	1.074
	いわき	NS	1.075	1.294	1.141
	(福島県)	EW	1.558	1.666	1.396
	福島F1_GN5	NS	2.074	2.15	1.974
	(東京電力)	EW	2.484	2.369	1.749
	福島F1_GS5	NS	2.007	1.921	1.244
	(東京電力)	EW	4.589	4.049	1.706
	福島F2_FF4	NS	2.136	1.74	1.507
	(東京電力)	EW	1.792	1.424	1.053
	東海第二_GRO1	NS	2.4	2.355	1.41
	(日本原電)	EW	1.655	1.601	1.297

表 5-15 地震応答変位(cm)
(以布利・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	4.441	3.756	1.728
		EW	3.762	3.182	2.029
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	6.043	4.417	2.023
		EW	6.67	6.274	3.776
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	6.67	6.724	3.776
		EW	7.878	7.962	4.283
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	3.426	2.619	1.731
		EW	5.052	2.133	1.36
	豊野	NS	1.691	1.716	0.856
		EW	1.932	1.631	1.135

表 5-17 地震応答変位(cm)
(大岐・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	4.38	3.845	2.332
		EW	3.559	3.963	3.01
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	5.883	4.506	2.584
		EW	6.724	6.913	5.05
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	5.262	4.911	2.229
		EW	7.284	7.467	4.982
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	3.48	3.062	2.039
		EW	3.463	2.323	1.705
	豊野	NS	2.051	2.142	1.124
		EW	3.463	2.323	1.705

表 5-16 地震応答変位(cm)
(以布利・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.677	0.703	0.447
		EW	0.944	0.658	0.391
	白糠南	NS	1.372	1.241	0.695
		EW	2.112	1.472	0.895
	静内	NS	0.594	0.498	0.284
		EW	0.745	0.546	0.394
	大樹	NS	1.176	7	0.768
		EW	1.259	1.276	0.889
豊頃	NS	1.702	1.61	1.458	
	EW	1.6	1.526	1.396	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	2.132	1.765	1.357
		(宮城県) EW	1.476	1.55	0.192
	女川	NS	10.403	9.672	4.212
		(東北電力) EW	1.938	1.58	1.146
	いわき	NS	0.998	1.244	1.12
		(福島県) EW	1.835	1.913	1.525
	福島F1_GN5	NS	2.411	2.399	2
		(東京電力) EW	2.88	2.483	1.67
	福島F1_GS5	NS	2.838	2.88	1.56
		(東京電力) EW	4.56	3.461	3.365
	福島F2_FF4	NS	3.288	2.234	1.81
		(東京電力) EW	2.281	1.52	1.152
	東海第二_GRO1	NS	3.133	3.532	1.875
		(日本原電) EW	2.328	1.683	1.111

表 5-18 地震応答変位(cm)
(大岐・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.734	0.78	0.543
		EW	0.834	0.766	0.449
	白糠南	NS	1.414	1.412	0.813
		EW	2.038	1.607	1.19
	静内	NS	0.635	0.529	0.4
		EW	0.778	0.602	0.453
	大樹	NS	1.337	1.32	0.896
		EW	1.45	1.587	1.176
豊頃	NS	1.621	2.031	1.893	
	EW	1.669	1.814	1.981	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	1.939	1.935	1.749
		(宮城県) EW	1.618	1.629	1.13
	女川	NS	9.362	8.611	4.325
		(東北電力) EW	1.842	1.585	1.332
	いわき	NS	0.937	1.375	1.244
		(福島県) EW	1.86	2.139	1.837
	福島F1_GN5	NS	2.393	2.467	2.242
		(東京電力) EW	3.079	2.849	2.295
	福島F1_GS5	NS	3.006	2.829	2.033
		(東京電力) EW	4.156	3.835	3.679
	福島F2_FF4	NS	2.864	2.447	2.157
		(東京電力) EW	1.984	1.661	1.392
	東海第二_GRO1	NS	2.961	3.5	2.194
		(日本原電) EW	2.08	1.776	1.3

表 5-19 地震応答変位(cm)
(久百々・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	4.515	3.879	2.025
		EW	3.861	3.871	2.374
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	6.878	5.331	2.317
		EW	7.726	8.206	5.778
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	5.519	4.36	2.147
		EW	8.298	9.043	5.692
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	3.412	2.832	1.8
		EW	3.762	2.785	1.454
	豊野	NS	1.914	1.875	0.938
		EW	2.09	1.731	1.133

表 5-21 地震応答変位(cm)
(鍵掛・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	3.31	2.786	1.795
		EW	2.477	2.352	1.962
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	4.554	3.94	1.86
		EW	5.909	5.579	2.296
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	3.286	3.572	1.714
		EW	6.058	5.921	3.693
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	2.117	1.964	1.5
		EW	2.24	1.534	1.32
	豊野	NS	1.486	1.552	0.852
		EW	1.488	1.263	1.058

表 5-20 地震応答変位(cm)
(久百々・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.692	0.705	0.454
		EW	0.95	0.656	0.404
	白糠南	NS	1.368	1.234	0.717
		EW	2.085	1.455	0.91
	静内	NS	0.589	0.491	0.296
		EW	0.719	0.531	0.403
	大樹	NS	1.152	1.002	0.77
		EW	1.209	1.25	0.896
	豊頃	NS	1.676	1.627	1.463
		EW	1.642	1.498	1.367
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	2.196	1.707	1.382
		(宮城県) EW	1.479	1.511	0.915
	女川	NS	10.719	9.961	4.279
		(東北電力) EW	2.002	1.587	1.107
	いわき	NS	1.033	1.278	1.141
		(福島県) EW	1.858	1.935	1.554
	福島F1_GN5	NS	2.48	2.361	2.028
		(東京電力) EW	3.02	2.56	1.67
	福島F1_GS5	NS	2.795	3.045	2.025
		(東京電力) EW	4.786	3.594	3.281
	福島F2_FF4	NS	3.364	2.218	1.828
		(東京電力) EW	2.419	1.532	1.184
	東海第二_GR01	NS	3.239	3.548	1.838
		(日本原電) EW	2.255	1.684	1.159

表 5-22 地震応答変位(cm)
(鍵掛・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.509	0.574	0.424
		EW	0.633	0.606	0.371
	白糠南	NS	1.068	1.004	0.663
		EW	1.412	1.189	0.783
	静内	NS	0.54	0.453	0.293
		EW	0.628	0.464	0.377
	大樹	NS	1.131	1.124	0.884
		EW	0.975	0.902	0.767
	豊頃	NS	1.248	1.507	1.385
		EW	1.223	1.341	1.176
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	1.439	1.454	1.16
		(宮城県) EW	1.207	1.16	0.855
	女川	NS	7.486	5.879	2.214
		(東北電力) EW	1.274	1.187	1.165
	いわき	NS	0.778	1.106	1.046
		(福島県) EW	1.372	1.574	1.384
	福島F1_GN5	NS	1.98	2.002	1.858
		(東京電力) EW	1.902	1.712	1.643
	福島F1_GS5	NS	2.288	1.912	1.042
		(東京電力) EW	2.921	2.709	1.906
	福島F2_FF4	NS	1.869	1.696	1.586
		(東京電力) EW	1.414	1.165	0.993
	東海第二_GR01	NS	2.192	2.174	1.543
		(日本原電) EW	1.568	1.256	1.048

表 5-23 地震応答変位(cm)
(大川内・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	3.605	3.109	2.104
		EW	2.832	2.6	2.317
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	4.972	4.679	2.163
		EW	6.422	6.071	2.964
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	4.014	3.568	1.868
		EW	6.062	6.123	4.176
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	2.453	2.314	1.753
		EW	2.42	1.679	1.462
	豊野	NS	1.602	1.742	0.958
		EW	1.602	1.397	1.118

表 5-25 地震応答変位(cm)
(下ノ加江・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	4.175	2.836	2.697
		EW	3.777	4.097	3.103
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	6.242	4.778	2.709
		EW	6.977	7.193	5.193
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	5.696	5.198	2.271
		EW	7.55	7.8	4.853
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	3.695	3.904	2.095
		EW	3.67	2.521	1.754
	豊野	NS	2.184	2.25	1.181
		EW	2.228	1.888	1.251

表 5-24 地震応答変位(cm)
(大川内・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.592	0.627	0.534
		EW	0.663	0.666	0.444
	白糠南	NS	1.167	1.138	0.762
		EW	1.547	1.345	0.947
	静内	NS	0.554	0.509	0.362
		EW	0.651	0.506	0.422
	大樹	NS	1.103	1.055	0.834
		EW	1.201	1.254	0.998
豊頃	NS	1.419	1.757	1.621	
	EW	1.362	1.513	1.511	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼 (宮城県)	NS	1.532	1.634	1.375
		EW	1.357	1.28	1.015
	女川 (東北電力)	NS	8.011	6.722	2.752
		EW	1.439	1.258	1.214
	いわき (福島県)	NS	0.867	1.273	1.194
		EW	1.464	1.743	1.599
	福島F1_GN5 (東京電力)	NS	2.118	2.183	2.025
		EW	2.172	2.242	1.941
	福島F1_GS5 (東京電力)	NS	2.611	2.171	1.305
		EW	3.217	3.048	2.662
	福島F2_FF4 (東京電力)	NS	1.586	1.367	1.118
		EW	2.129	1.988	1.853
東海第二_GRO1 (日本原電)	NS	2.29	2.465	1.808	
	EW	1.683	1.385	1.198	

表 5-26 地震応答変位(cm)
(下ノ加江・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.749	0.809	0.554
		EW	0.886	0.771	0.453
	白糠南	NS	1.483	1.479	0.824
		EW	2.198	1.701	1.234
	静内	NS	0.667	0.546	0.405
		EW	0.825	0.634	0.455
	大樹	NS	1.396	1.374	0.905
		EW	1.506	1.662	1.205
豊頃	NS	1.739	2.078	1.987	
	EW	1.76	1.843	2.023	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼 (宮城県)	NS	2.075	2.057	1.811
		EW	1.683	1.682	1.17
	女川 (東北電力)	NS	9.747	9.131	4.749
		EW	1.982	1.735	1.364
	いわき (福島県)	NS	0.988	1.392	1.257
		EW	1.962	2.221	1.885
	福島F1_GN5 (東京電力)	NS	2.55	2.657	2.351
		EW	3.121	3.291	2.313
	福島F1_GS5 (東京電力)	NS	3.149	2.894	2.188
		EW	4.496	3.988	3.808
	福島F2_FF4 (東京電力)	NS	3.23	2.626	2.212
		EW	2.232	1.741	1.439
東海第二_GRO1 (日本原電)	NS	3.216	3.741	2.355	
	EW	2.418	1.884	1.303	

表 5-27 地震応答変位(cm)(布・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	3.07	2.613	1.655
		EW	2.332	2.16	1.679
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	4.209	3.275	1.712
		EW	5.589	4.95	1.651
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	2.956	3.187	1.562
		EW	5.872	5.526	3.236
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	1.972	1.765	1.383
		EW	2.079	1.444	1.199
	豊野	NS	1.42	1.447	0.784
		EW	1.4	1.19	0.998

表 5-28 地震応答変位(cm)(布・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.463	0.547	0.383
		EW	0.609	0.537	0.343
	白糠南	NS	1.296	1.092	0.719
		EW	1.009	0.927	0.621
	静内	NS	0.53	0.402	0.252
		EW	0.615	0.448	0.337
	大樹	NS	0.871	0.806	0.638
		EW	1.082	1.058	0.802
	豊頃	NS	1.146	1.387	1.204
		EW	1.113	1.219	1.043
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼 (宮城県)	NS	1.375	1.332	1.067
		EW	1.121	1.042	0.768
	女川 (東北電力)	NS	7.021	5.224	1.919
		EW	1.189	0.963	1.04
	いわき (福島県)	NS	0.737	1.025	0.957
		EW	1.321	1.487	1.246
	福島F1_GN5 (東京電力)	NS	1.883	1.84	1.729
		EW	1.703	1.566	1.496
	福島F1_GS5 (東京電力)	NS	2.031	1.717	0.95
		EW	2.739	2.445	1.535
	福島F2_FF4 (東京電力)	NS	1.7	1.497	1.421
		EW	1.317	1.074	0.939
	東海第二_GRO1 (日本原電)	NS	2.171	1.92	1.33
		EW	1.459	1.215	1.021

表 5-29 地震応答変位(cm)
(清水・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	2.335	1.818	1.098
		EW	1.725	1.49	0.929
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	2.112	1.728	1.17
		EW	4.668	4.157	1.364
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	1.448	1.6	0.813
		EW	6.163	5.745	1.955
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	1.422	1.072	0.686
		EW	2.253	1.315	0.642
	豊野	NS	1.266	1.208	0.6
		EW	1.011	0.698	0.651

表 5-31 地震応答変位(cm)
(清水空き家・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	ランク1	ランク2	ランク3
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	10.891	30.067	34.694
		EW	2.776	5.289	5.474
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	6.705	13.79	13.679
		EW	7.164	17.404	21.583
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	4.123	6.794	7.013
		EW	8.943	19.032	24.065
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	4.459	5.334	6.146
		EW	11.293	16.257	27.669
	豊野	NS	5.341	9.731	10.586
		EW	2.661	6.868	9.887

表 5-30 地震応答変位(cm)
(清水・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.782	0.39	0.201
		EW	1.001	0.485	0.289
	白糠南	NS	1.661	0.751	0.454
		EW	2.456	0.823	0.5
	静内	NS	0.753	0.289	0.204
		EW	0.973	0.424	0.263
	大樹	NS	1.57	0.585	0.408
		EW	1.708	0.782	0.541
豊頃	NS	2.048	1.034	0.876	
	EW	2.268	0.889	0.704	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	2.335	1.069	0.767
	(宮城県)	EW	1.838	0.83	0.482
	女川	NS	10.526	3.007	1.232
	(東北電力)	EW	2.271	0.665	0.617
	いわき	NS	1.142	0.748	0.788
	(福島県)	EW	2.218	1.087	0.812
	福島F1_GN5	NS	2.845	1.109	1.079
	(東京電力)	EW	3.463	1.379	0.965
	福島F1_GS5	NS	3.273	1.201	0.698
	(東京電力)	EW	5.066	2.036	1.115
	福島F2_FF4	NS	3.904	0.97	0.813
	(東京電力)	EW	2.684	0.811	0.595
東海第二_GRO1	NS	3.745	1.419	0.845	
(日本原電)	EW	2.5	0.892	0.758	

表 5-32 地震応答変位(cm)
(清水空き家・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	ランク1	ランク2	ランク3
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	1.173	2.17	5.157
		EW	1.959	7.154	14.328
	白糠南	NS	2.144	6.856	10.964
		EW	5.021	17.201	33.526
	静内	NS	1.178	2.616	5.534
		EW	2.225	14.536	16.544
	大樹	NS	0.938	1.154	2.073
		EW	1.235	4.15	6.974
豊頃	NS	2.696	14.513	30.263	
	EW	2.362	5.839	8.443	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼	NS	4.067	14.108	21.134
	(宮城県)	EW	1.194	2.531	4.118
	女川	NS	9.319	8.643	6.835
	(東北電力)	EW	2.242	5.272	6.92
	いわき	NS	3.415	9.19	14.427
	(福島県)	EW	3.32	6.887	9.334
	福島F1_GN5	NS	2.538	5.164	6.781
	(東京電力)	EW	9.691	11.827	12.408
	福島F1_GS5	NS	2.551	3.618	4.835
	(東京電力)	EW	7.547	11.528	10.869
	福島F2_FF4	NS	3.311	5.917	6.525
	(東京電力)	EW	3.688	4.026	5.874
東海第二_GRO1	NS	4.318	5.567	5.618	
(日本原電)	EW	4.275	4.672	3.888	

表 5-33 地震応答変位(cm)
(松尾・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	4.441	3.756	1.728
		EW	3.762	3.182	2.029
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	6.043	4.417	2.023
		EW	6.67	6.274	3.776
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	6.67	6.724	3.776
		EW	7.878	7.962	4.283
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	3.426	2.619	1.731
		EW	5.052	2.133	1.36
	豊野	NS	1.691	1.716	0.856
		EW	1.932	1.631	1.135

表 5-35 地震応答変位(cm)
(松尾空き家・内陸地震入力)

内陸地震	観測点	成分	ランク1	ランク2	ランク3
2000年 鳥取県西部地震	日野	NS	11.416	23.504	25.066
		EW	6.359	6.894	6.458
2004年 新潟中越地震	長岡	NS	8.471	16.203	11.387
		EW	8.218	17.627	18.559
2007年 新潟中越沖地震	柏崎刈羽SG4 (東京電力)	NS	8.218	17.627	18.559
		EW	10.996	14.639	18.586
2016年 熊本地震・本震	益城	NS	6.671	7.588	8.51
		EW	14.953	23.432	15.662
	豊野	NS	5.849	8.812	8.772
		EW	3.719	8.276	9.266

表 5-34 地震応答変位(cm)
(松尾・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	1981年以前	1981年以降	2000年以降
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	0.463	0.547	0.383
		EW	0.609	0.537	0.343
	白糠南	NS	1.296	1.092	0.719
		EW	1.009	0.927	0.621
	静内	NS	0.53	0.402	0.252
		EW	0.615	0.448	0.337
	大樹	NS	0.871	0.806	0.638
		EW	1.082	1.058	0.802
豊頃	NS	1.146	1.387	1.204	
	EW	1.113	1.219	1.043	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼 (宮城県)	NS	1.375	1.332	1.067
		EW	1.121	1.042	0.768
	女川 (東北電力)	NS	7.021	5.224	1.919
		EW	1.189	0.963	1.04
	いわき (福島県)	NS	0.737	1.025	0.957
		EW	1.321	1.487	1.246
	福島F1_GN5 (東京電力)	NS	1.883	1.84	1.729
		EW	1.703	1.566	1.496
	福島F1_GS5 (東京電力)	NS	2.031	1.717	0.95
		EW	2.739	2.445	1.535
	福島F2_FF4 (東京電力)	NS	1.7	1.497	1.421
		EW	1.317	1.074	0.939
東海第二_GRO1 (日本原電)	NS	2.171	1.92	1.33	
	EW	1.459	1.215	1.021	

表 5-36 地震応答変位(cm)
(松尾空き家・海溝型地震入力)

海溝型地震	観測点	成分	ランク1	ランク2	ランク3
2003年 十勝沖地震	門別西	NS	1.317	3.129	4.363
		EW	2.333	4.511	6.899
	白糠南	NS	3.701	6.399	9.65
		EW	5.744	16.018	23.691
	静内	NS	1.49	4.426	7.05
		EW	3.917	16.184	14.657
	大樹	NS	1.104	2.058	4.054
		EW	1.597	6.71	7.924
豊頃	NS	2.351	10.88	15.071	
	EW	3.808	6.571	7.804	
2011年 東北地方太平洋沖地震	岩沼 (宮城県)	NS	4.012	13.243	19.205
		EW	1.911	4.007	6.756
	女川 (東北電力)	NS	11.82	10.757	8.504
		EW	4.46	8.3	8.554
	いわき (福島県)	NS	6.562	10.636	11.981
		EW	4.856	8.558	10.155
	福島F1_GN5 (東京電力)	NS	4.95	6.746	6.695
		EW	12.982	14.196	11.296
	福島F1_GS5 (東京電力)	NS	3.922	5.871	6.294
		EW	13.136	12.275	11.461
	福島F2_FF4 (東京電力)	NS	7	7.814	6.377
		EW	3.993	6.134	5.244
東海第二_GRO1 (日本原電)	NS	7.335	7.804	7.471	
	EW	5.433	5.085	5.442	

内陸地震を入力した場合には土佐清水市の多くの地点でどの建物でも一部損壊程度の被害が出るという結果となった。そして表 5-13 に示す大浜エリアでは新潟中越沖地震で観測された地震波を入力したときのように一部では 9 cm を超える中破の被害が出るということが分かった。また海溝型地震を入力した場合にも多くが一部損壊程度の被害となった。東北地方太平洋沖地震女川観測点の地震波の NS 成分を入力した際には 1981 年以前の古い建物で多く中破の被害が見られた。内陸地震、海溝型地震ともに建設年を考慮した解析では大破の被害は見られなかった。

次に清水地区と松尾エリアの空き家の木造住宅の 1 階応答変位を見る。空き家は建設年を考慮した応答変位よりも全体的に大きな応答変位となっている。応答変位が 14 cm を大きく超える大破の被害が出る建物も見受けられる。また清水地区、松尾エリアともに内陸地震の方が空き家の 1 階地震応答変位が大きいことが分かった。海溝型地震に比べて内陸地震の方が全体的に建設年を考慮したときの応答変位よりも空き家の応答変位が大幅に上がっている。そして、松尾エリアに比べて清水地区の方が応答変位が 30 cm を超えるような大きな被害が見られた。

以布利エリアでは東北地方太平洋沖地震大樹観測点の地震波を入力して解析を行った時の結果を見ると、1981 年以前の最も古く分類されている建物より 1981 年から 2000 年の比較的新しい建物の方が応答変位が大きくなっている。このように古い建物より新しい建物の方が木造住宅の応答変位が大きくなっているものが内陸地震入力の場合、海溝型地震入力の場合とも、いくつか見られる。これは建物が古いほど弱く、地震の強震動によって被害を受けやすいと考えがちだが、一概にそうは言えないということを示している。この要因として考えられることは、建物の固有周期と強震動の周期との関係がある。建物の固有周期と地震の周期が一致すると共振し、その建物は大きく揺れる。そのため、解析を行う際にそれぞれ入力した建物の固有周期とその地点の地表強震動の周期が一致したことより、応答変位が大きくなったと考えられる。しかし本研究の結果を見ると多くは古い建物の方が応答変位は大きい。これより古い建物が地震に弱く危険だということと言えるが、新しいから安全というわけではなく、建設地の地盤増幅特性による地表強震動の周期と建物の固有周期が一致すると大きく揺れるということが分かった。またこれは空き家の 1 階地震応答変位にも言えることである。空き家の 1 階地震応答変位結果を見ると多くはランクが上がるにつれて(状態が悪くなるにつれて)1 階地震応答変位は大きくなるが、いくつかの地表強震動によっては状態が悪いからといって応答変位が大きくなるわけではなく固有周期との一致で大きくなっていると考えられる。

5.3 GISによる地震建物被害可視化

本研究では土佐清水市でボーリング柱状図が存在した 15 地点において作成した地表強震動を用いて木造住宅の 1 階地震応答変位を求めた。また現地調査より分かった空き家の情報から、ランク 1、2、3 に分けて劣化を考慮した空き家の 1 階地震応答変位を求めた。この得られたデータを GIS に入力し、土佐清水市の各地区の建物被害の可視化を試みた。空き家の現地調査は清水地区と足摺岬エリアである。そこで、地表強震動は土佐清水市の 15 地点から、清水地区と足摺岬エリアに最も近い距離にある清水地区と松尾エリアの地表強震動を入力し、可視化した。以下に GIS による結果を示す。

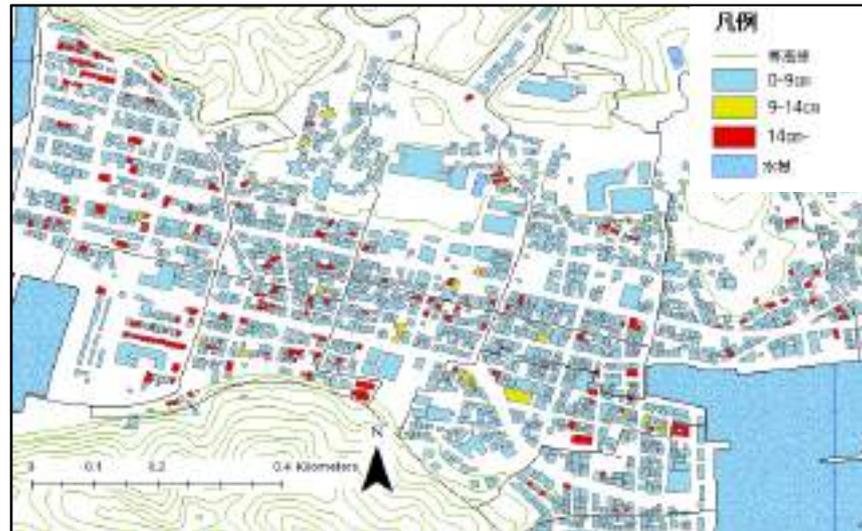


図 5-3 清水地区の木造住宅被害
(内陸地震・鳥取県西部地震)

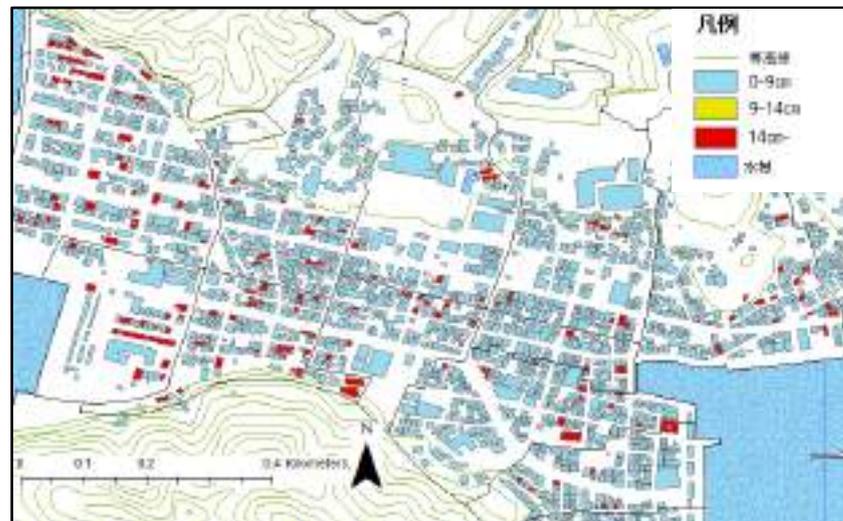


図 5-4 清水地区の木造住宅被害
(内陸地震・新潟中越地震)

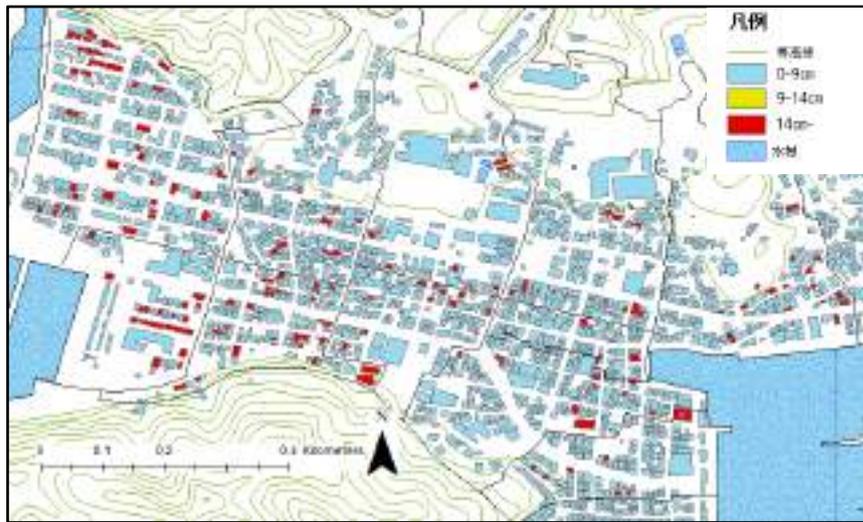


図 5-5 清水地区の木造住宅被害
(内陸地震・新潟中越沖地震)

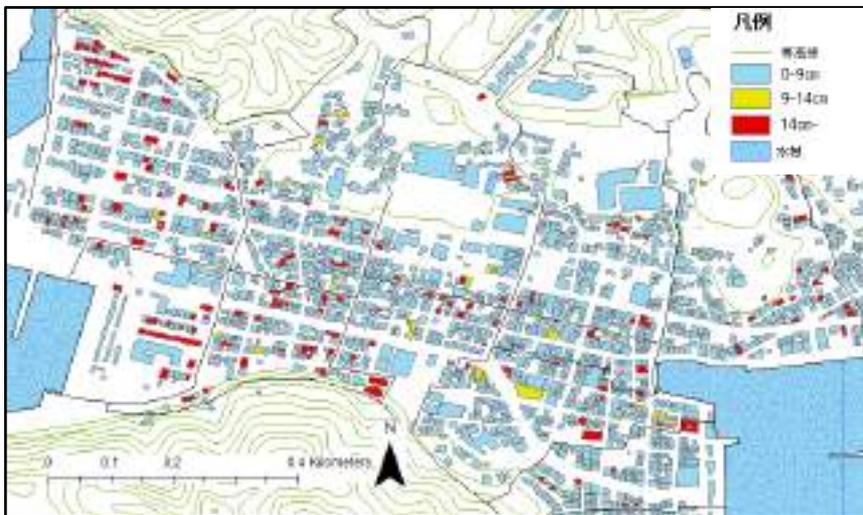


図 5-6 清水地区の木造住宅被害
(内陸地震・熊本地震益城観測点)

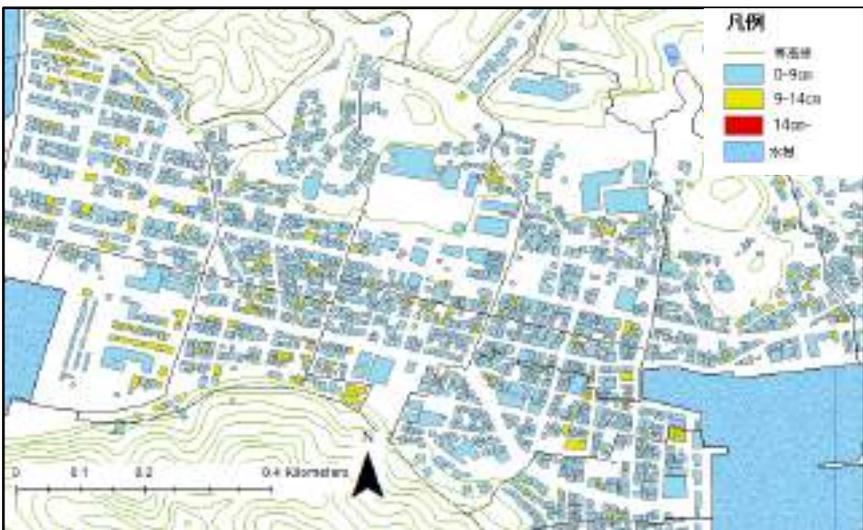


図 5-7 清水地区の木造住宅被害
(内陸地震・熊本地震豊野観測点)

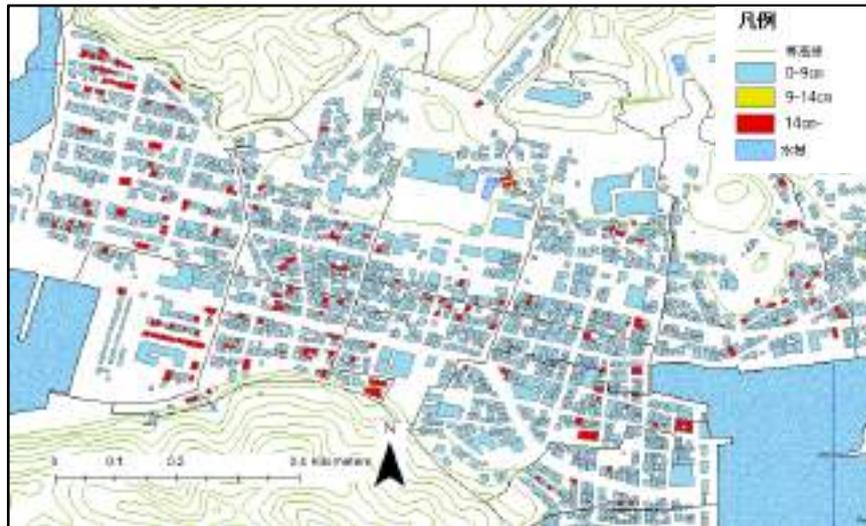


図 5-8 清水地区の木造住宅被害
(海溝型地震・十勝沖地震)

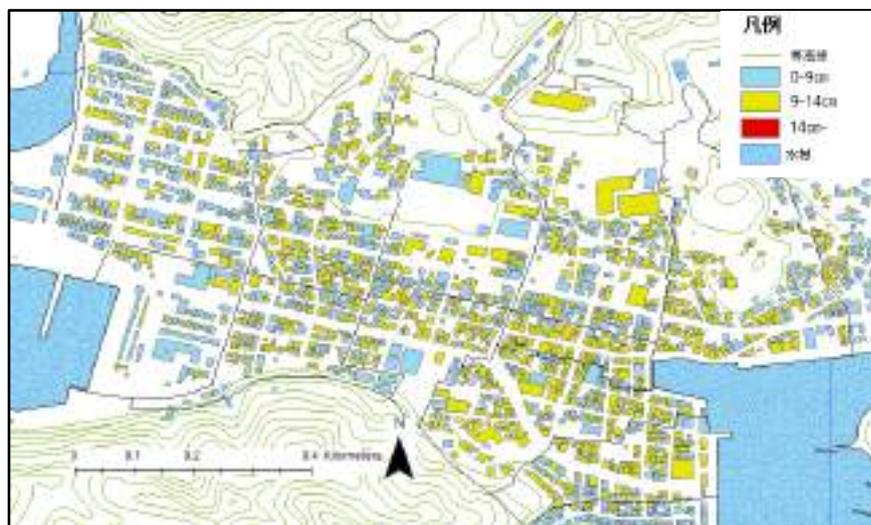


図 5-9 清水地区の木造住宅被害
(海溝型地震・東北地方太平洋沖地震)

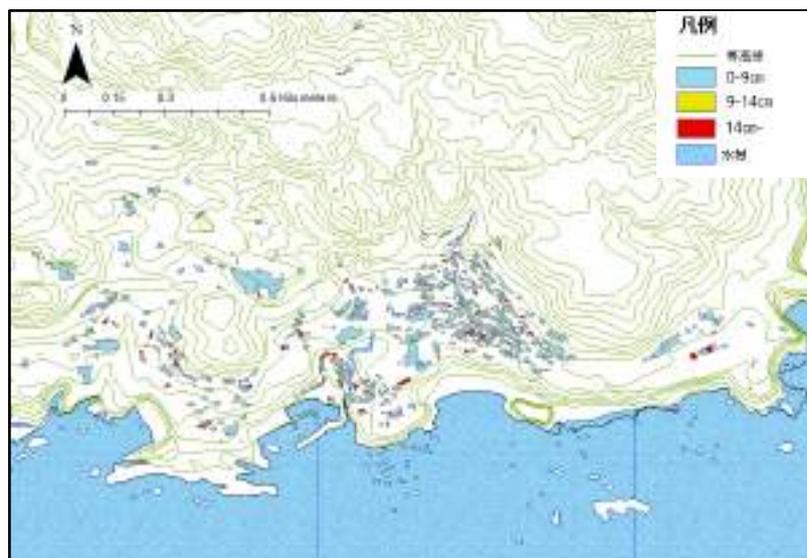


図 5-10 足摺岬エリアの木造住宅被害
(内陸地震・鳥取県西部地震)

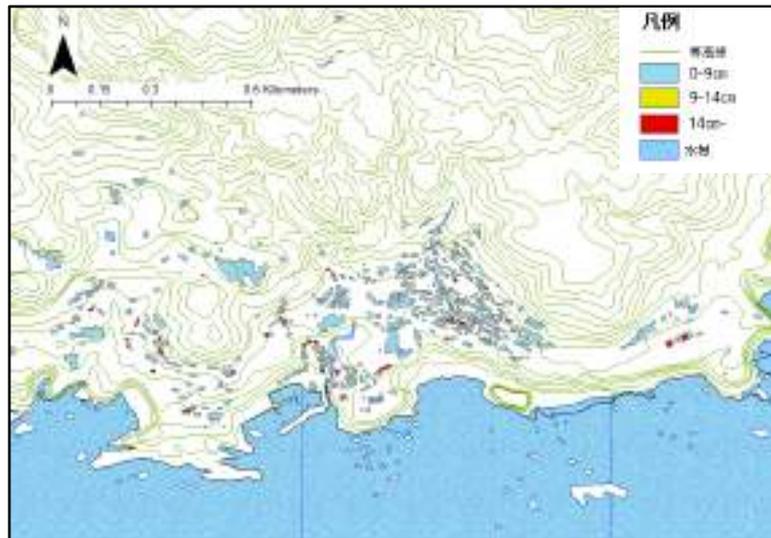


図 5-11 足摺岬エリアの木造住宅被害
(内陸地震・新潟中越地震)



図 5-12 足摺岬エリアの木造住宅被害
(内陸地震・新潟中越沖地震)



図 5-13 足摺岬エリアの木造住宅被害
(内陸地震・熊本地震益城観測点)



図 5-14 足摺岬エリアの木造住宅被害
(内陸地震・熊本地震豊野観測点)

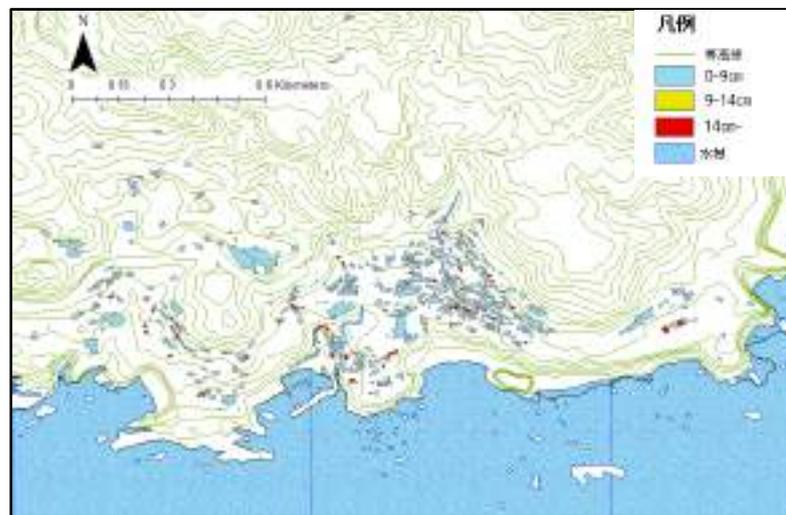


図 5-15 足摺岬エリアの木造住宅被害
(海溝型地震・十勝沖地震)



図 5-16 足摺岬エリアの木造住宅被害
(海溝型地震・東北地方太平洋沖地震)

GIS を使って、木造住宅の 1 階応答変位およびその応答量によって一部損壊・中破・大破の被害を可視化することによって土佐清水市の建物被害を数パターン表すことが可能となった。図 5-3～図 5-7、図 5-10～図 5-14 で示す内陸地震の強震動を入力した場合を見てみると多くが水色で表される一部損壊の被害となった。そしてところどころに黄色の中破や赤色の大破の被害が見られる。ここで図 4-37、図 4-38 の空き家分布を見ると、空き家分布と中破・大破の被害分布の多くが一致している。内陸地震の強震動では、人が住んでいる建物は一部損壊の被害が多いが、空き家ではほとんどが中破や大破などの被害が出るのが分かった。

次に図 5-8、図 5-15 で示す海溝型地震の十勝沖地震の強震動を入力した場合を見る。清水地区、足摺エリアともに内陸地震の強震動入力の時と同じように、多くが一部損壊で空き家が中破・大破の被害となった。そして図 5-10、図 5-17 で示す東北地方太平洋沖地震を入力した場合を見ると、多くが中破の被害となり、東北地方太平洋沖地震の地表強震動では空き家の有無はあまり関係していないということが分かる。この要因としては、東北地方太平洋沖地震から作成した地表強震動と、空き家の耐震性による固有周期の違いによる応答特性が関係していると考えられる。

第6章 結び

本研究では今までに観測された工学的基盤強震動より土佐清水市の地盤データを用いた地表強震動を作成し、建物の建設年を基盤として木造住宅の地震応答解析を行い、また、清水地区と足摺岬エリアは空き家の劣化を考慮した地震応答解析も行った。これより以下の知見を得た。

- 1) 清水地区と足摺岬エリアの空き家現地調査を実施してその地区分布を把握した。
- 2) 清水地区と足摺岬エリアにおいて、被害の小さい強震動が入力されても空き家には大きな被害が生じる可能性が高い。
- 3) 東北地方太平洋沖地震の強震動では、空き家に関わらず多くの建物が中破の被害が出る。
- 4) 海溝型地震に比べて内陸地震のほうが空き家への影響は大きい。

謝辞

本研究及び益城町での本現地調査に関しては、土佐清水ジオパーク構想活動支援事業による助成を受けて実施したものである。

本研究において、建物建設年につきましては土佐清水市市役所データを提供していただきました。空き家の現地調査にあたっては、環境省四国環境パートナーシップオフィス(四国 EPO、高知デスク)の内田洋子様ご教授いただきました。

以上、諸機関及び諸氏に関してここに記して、深甚の謝意を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 江口拓実：GIS を用いた土佐清水市の地震建物被害に関する研究-建物の建設年を基盤情報とした試み-, 高知工業高等専門学校環境都市デザイン工学科 49 期生, 卒業研究論文, 2019. 2
- 2) 防災科学技術研究所強震観測網:<http://www.bosai.go.jp/>
- 3) 高知地盤情報利用連絡会：こうち地盤情報公開サイト,
<https://geonews.zenchiren.or.jp/kochi/webgis/>
- 4) 構造計画研究所：成層地盤地震応答解析プログラム, k-SHAKE+Windows V7.0
- 5) 高知市空家等対策計画 高知市, 平成 29 年 3 月, 平成 30 年 9 月一部改正 P. 1
https://www.city.kochi.kochi.jp/uploaded/life/88165_208180_misc.pdf
- 6) 土佐清水市空家等対策計画: 土佐清水市, 平成 29 年 3 月, P. 4
https://www.city.tosashimizu.kochi.jp/fs/1/4/5/6/8/7/_/akiyaplan.pdf
- 7) 高知市空家等対策計画: 高知市, 平成 29 年 3 月, 平成 30 年 9 月一部改正, 資料 12
https://www.city.kochi.kochi.jp/uploaded/life/88165_208180_misc.pdf

本研究に関連して行った研究発表等

- 1) 池田雄一：人口減少地域における地震建物被害に関する事例研究，
－高知県土佐清水市を対象として－，日本自然災害学会学術講演会
講演概要集，pp. 107-108，2019. 9
- 2) 仮谷舞花，池田雄一：空き家の耐震性低下を考慮した土佐清水市の地震建物被害に
関する事例研究，－人口減少地域における高知県土佐清水市を対象として
－，令和元年度自然災害フォーラム&21世紀の南海地震と防災(第14巻)，
pp. 1-10，2019. 12

本研究に関連して行った講演等

招待講演

- 1) 池田雄一：将来の南海トラフ巨大地震を見据えた土佐清水市の地震建物被害に
関する研究，-GIS を活用した建物の建設年を基盤情報とした建物被害の
試み-，土佐清水自然史研究会 発足記念講演，「自然との付き合い方を
考える」，土佐清水市中央公民館ホール，2019. 6