

東濃地震科学研究所報告

Seq. No.41

地域地震防災基準に関する基本問題研究委員会報告書（平成 29 年度）



2018年3月

公益財団法人 地震予知総合研究振興会

目次

1. 岡田尚子・大西一嘉	
福祉施設や福祉避難所における避難者受入に関する研究	1
2. 古川愛子・増田景也・清野純史	
ブロック形状および支持条件がインターロッキング組積造壁の斜め圧縮試験結果に及ぼす影響	9
3. 野口 竜也・久野 雅幸・上野 太士・中井 翔・香川 敬生	
鳥取県気高地域における微動観測に基づく地盤構造推定	19
4. 岡田成幸	
災害リスクの構造と工学的制御の方法	25
5. 釜ヶ谷悠馬・松岡昌志	
2016 年熊本地震後の空中写真を用いた深層学習による 建物被害分類	49
6. 清野純史・馬淵亮太郎・岩橋卓也	
ブレーキ操作に着目した地震時の車両挙動について	59
7. 磯打千雅子	
地区防災計画から波及する多様な展開の可能性	69
8. 能島暢呂・山本大喜	
内陸地殻内地震による強震動のエネルギー入力について	73
9. 志垣智子・太田 裕・宮野道雄	
地震に起因する人間被害の把握と減災戦略 (短報)	85
10. 村上ひとみ	
2016 年熊本地震における熊本市消防局の救助・救急活動について —2004 年新潟県中越地震・2005 年福岡県西方沖地震との比較—	93
11. 木股文昭	
御嶽山火山防災にネットワークの一層の活用を	99
地域地震防災基準に関する基本問題研究委員会 委員名簿と研究会開催	107

福祉施設や福祉避難所における避難者受入に関する研究

神戸大学都市安全研究センター 岡田尚子
神戸大学大学院工学研究科 大西一嘉

Study on Acceptance of Evacuees at Welfare Facilities and Shelters with Additional Assistance and Consideration

OKADA Naoko
Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

OHNISHI Kazuyoshi
Graduate School of Engineering, Kobe University

1. 背景

福祉の分野においては、従来の施設入所によるケアから、地域に居住し予防や介護のサービスを受ける地域包括ケアへと移行が進められている。それに伴い、従来から福祉避難所の対象としていた要配慮者（つまり、入所しておらず、災害時には一旦一般避難所へ避難することが想定されている要配慮者）が急増している。そのような状況下で、2016年に発生した熊本地震では、福祉避難所で想定通りの対応が出来なかったことが報道されている¹⁾。

災害時に要配慮者の受入が期待されている福祉施設では、建物の被災や、職員の被災、入所者の状況等、様々な要因により受入が出来ない状況に陥る可能性がある。本研究では、2016年熊本地震において、どのような施設で避難者を受入可能であったかを把握するものとした。

2. アンケート調査の概要

2-1) アンケート調査の対象範囲

2016年熊本地震において、震度5強超が3回以上発生した自治体に立地する施設等へアンケート調査を行なった。ただし、芦北町は震度5強超が1回であったが、福祉避難所を開設したことが判明していたため、調査対象に含めた。

対象とした施設は表1のとおり。まず、先述した自治体に立地する福祉避難所の協定を事前に締結していた施設等は、全て調査対象とした。次に、高齢者・障害者の福祉施設等のうち、定員20名以上の施設等を対象とした。これは、比較的規模の大きい施設では、地域交流スペースやデイサービス、通所サービスを併設している場合があり、そこで避難者を受入れたと推測したためである。

2-2) アンケート調査の配布・回収状況

表2のとおり、19市町村に立地する計541ヵ所へ配布し、計139ヵ所から回答を得た。調査期間は2016年11月7日から2017年1月12日である。また、著者は2017年10月に福祉避難所を開設した施設へヒアリング調査を行なっており、そのうちアンケート調査が未回収の施設には再依頼をしたところ、1ヵ所から回答を得ているため、本研究に含めた。

回収施設を施設用途別にみたのが図1である。有料老人ホームが最も多く40カ所（うち、協定締結施設4カ所）、次いで、指定障害者支援施設が22カ所（うち、協定締結施設20カ所）となった。震度5強超が3回以上発生した自治体に立地する施設等へアンケート調査を行なった。ただし、芦北町は震度5強超が1回であったが、福祉避難所を開設したことが判明していたため、調査対象に含めた。

3. 結果

3-1) 避難者の受入方

福祉避難所、入所、任意受入の3つの受入方について、分類し、受入の有無をみたのが図2である。136カ所中、受入なしは40カ所（29.4%）にとどまり、70%の施設等は何らか形で避難者を受入れる。福祉避難所は47カ所、入所（従来のショートステイ、超過受入等含む）は28カ所、任意受入（施設等が任意で場所や食事を提供）は70カ所である。それらのうち、計44カ所は2種類ないしは3種類の受入方をしている。

3-2) 立地

狭域防災情報サービス協議会による本震の震度分布図（消防研究センターの被害推定 Web システムで配信された本震の震度分布を基に作成）²⁾に、回答施設の立地を同時付置したのが図3である。熊本市を中心に回答が多いが、震度6強以上を観測している地域でも、「受入なし」が多くみられる。震度6弱以下の地域では、「任意受入」はやや少なく、「福祉避難所」や「入所」での対応がみられる。



図1 回収施設の施設用途

表1 アンケート調査の対象施設

		入居を伴う福祉施設等		その他(宿泊施設等)
		定員20名以上	定員20名未満	
福祉避難所の協定締結あり	高齢	特養・養護老人ホーム 介護老人保健施設 有料老人ホーム・サ高住	認知症高齢者GH 有料老人ホーム ケアハウス	小規模多機能型居宅介護 デイサービス
	障害	指定障害者支援施設	障害者GH	就労支援事業所 児童発達支援事業所
	他			保健センター・公民館 宿泊施設・大学
福祉避難所の協定締結なし	高齢	特養・養護老人ホーム 介護老人保健施設 有料老人ホーム・サ高住		
	障害	指定障害者支援施設 療養介護施設		

3-3) 受入方別にみた避難者受入体制

数量化Ⅱ類により、避難者の受入の有無に係わる判別分析を行なった。なお、いずれかの質問で無回答が含まれる施設等は除き、123カ所について分析した。

福祉避難所、入所、任意受入など、様々な受入方をしているが、何らかの形で避難者を受入れたか否かを分析したのが表3である。判別の中率は63.4%であり、やや傾向がみられた。要因としては、「罹災証明」「職員参集」「周辺住民からの受入期待度」による影響が大きい。特に、「周辺住民からの受入期待度」が高い場合、「地震マニュアル」がある場合に受入れられる傾向にある。一方で、「罹災証明」がある場合は、受入れられない傾向にある。

受入方によって、それらの傾向が異なるかをみたのが、表4～表6である。同じアイテムを用いて、受入方ごとに分析した。

福祉避難所としての受入の有無（表4、判別の中率77.2%）に係わる分析では、「福祉避難所協定」「周辺住民からの受入期待度」が大きく影響している。「福祉避難所協定」がある場合に福祉避難所が開設されたということはもちろんのこと、「周辺住民からの受入期待度」が高い場合に福祉避難所が開設された傾向にあるという結果は、周辺住民が避難してきたことで後追いで福祉避難所の指定がされた場合もあったためと解釈できる。

入所としての受入の有無（表5、判別の中率61.0%）に係わる分析では、「福祉避難所協定」「職員参集」が大きく影響している。「福祉避難所協定」がない場合、「職員参集」が成功または必要なかった場合に受入られている。福祉避難所としての受入有無と異なり、「周辺住民からの受入期待度」は大きく影響はしない。これは、介護保険制度に則った受入となるため、受入可能な要配慮者が限られていることによると思われる。任意受入の有無（表6、判別の中率63.4%）に係わる分析では、「職員参集」が最も大きく影響しており、次いで「福祉避難所」「水道停止」「周辺住民からの受入期待度」となっている。「職員参集」がどちらともいえない・失敗とされているにも関

表2 アンケート調査の配付回収状況

自治体	配布	回収数			回収率
		協定なし	協定あり	計	
熊本市北区	237	26	36	62	26.2%
熊本市西区					
熊本市南区					
熊本市東区					
熊本市中央区					
八代市	57	7	7	14	24.6%
玉名市	26	2	5	7	26.9%
菊池市	22	3	3	6	27.3%
宇土市	17	2	3	5	29.4%
宇城市	34	5	2	7	20.6%
阿蘇市	18	1	4	5	27.8%
合志市	25	1	4	5	20.0%
美里町	9	3	0	3	33.3%
大津町	11	2	2	4	36.4%
菊陽町	17	4	1	5	29.4%
産山村	2	0	0	0	0.0%
南阿蘇村	24	2	4	6	25.0%
西原村	3	0	1	1	33.3%
御船町	5	0	0	0	0.0%
嘉島町	4	0	0	0	0.0%
益城町	12	0	3	3	25.0%
氷川町	11	3	0	3	27.3%
芦北町	7	1	2	3	42.9%
合計	541	62	77	139	25.7%

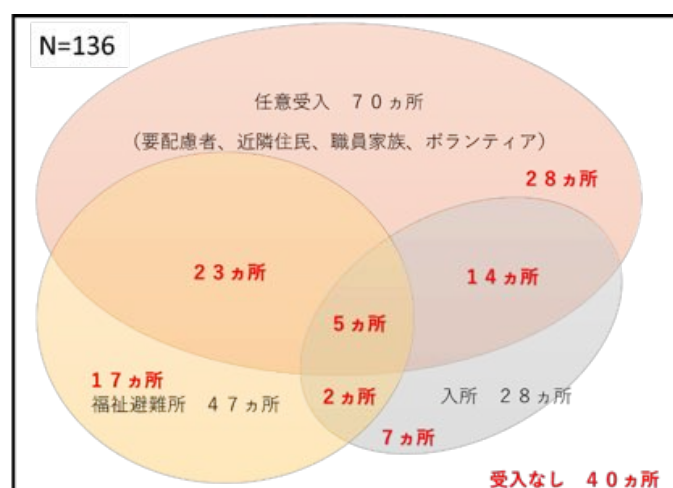


図2 避難者の受入方

わらず任意受入をしている。「水道停止」ありとも関係があることから、被災が大きい地域に立地している施設で任意受入されている可能性が考えられる。

3-4) 受入方別にみた増えた業務

避難者の受入の有無に係わらず、地震後には、ライフラインの確保や被害箇所の点検・応急手当、入居者・職員の健康管理等、様々な業務を強いられる。また、職員が被災した場合は、その業務の補完をする必要があり、多大な負担となり得る。それらの増えた業務が受入方によって異なるかを数量化Ⅱ類により分析した。

まずは、何らかの形で避難者を受入れたか否かで分析したのが表7である。判別の中率 76.9%であり、以下の傾向がみられた。

要因としては「避難者受入」「飲料水の確保」「食料確保・提供」による影響が大きい。何らかの形で避難者を受入れた場合「飲料水の確保」は業務量が増えず、「食料の確保」「生活用水の確保」は業務量が増えた傾向にある。また、「外部支援活用」は業務量が増えた。支援を受けることである程度の業務負担は減ると考えられるが、一方で、支援の依頼や、支援内容の説明などが負担になったと思われる。

次に、受入方によって、それらの傾向が異なるかをみたのが、表8～表10である。同じアイテムを用いて、受入方ごとに分析した。

福祉避難所としての受入の有無（表8、判別の中率 78.5 %）に係わる分析では、「避難者の受入」が最も大きく影響しており、福祉避難所を開設した場合には、「避難者の受入」に関する業務量が増えている。



図3 受入方別にみた施設の立地

表3 避難者受入体制

外的基準	カテゴリー	度数	スコアの重心	相関比	判別の中率
受入	あり	87	-0.249	0.1499	63.4%
	なし	36	0.602		
アイテム	カテゴリー	度数	スコア	レンジ	偏相関
罹災証明	あり	28	0.9422	1.220	0.203
	なし	95	-0.278		
水道停止	あり	70	-0.042	0.096	0.015
	なし	53	0.0549		
電気停止	あり	58	0.2892	0.547	0.085
	なし	65	-0.258		
併設施設	あり	81	0.0798	0.234	0.044
	なし	42	-0.154		
職員参集	成功	66	-0.29	1.013	0.144
	どちらともいえない 失敗	33	0.0546		
	必要なし	24	0.7231		
周辺住民からの受入期待度	高い	45	-0.706	1.113	0.201
	どちらともいえない 低い	78	0.4073		
地震マニュアル	あり	58	-0.487	0.922	0.183
	なし	65	0.4346		
福祉避難所協定	あり	67	-0.163	0.359	0.067
	なし	56	0.1954		

表 4 福祉避難所開設有無別にみた避難者受入体制

外的基準	カテゴリー	度数	スコアの重心					相関比	判別的中率
福祉避難所開設	あり	43	-0.802					0.3458	77.2%
	なし	80	0.431						
アイテム	カテゴリー	度数	スコア					レンジ	偏相関
罹災証明	あり	28	0.1632					0.211	0.062
	なし	95	-0.048						
水道停止	あり	70	0.0305					0.071	0.019
	なし	53	-0.04						
電気停止	あり	58	0.2357					0.446	0.121
	なし	65	-0.21						
併設施設	あり	81	0.0204					0.060	0.020
	なし	42	-0.039						
職員参集	成功	66	-0.269					0.650	0.196
	どちらともいえない 失敗	33	0.2612						
	必要なし	24	0.3811						
周辺住民からの 受入期待度	高い	45	-0.718					1.132	0.339
	どちらともいえない 低い	78	0.414						
地震マニュアル	あり	58	-0.042					0.079	0.027
	なし	65	0.0371						
福祉避難所協定	あり	67	-0.59					1.296	0.388
	なし	56	0.7062						

表 5 入所有無別にみた避難者受入体制

外的基準	カテゴリー	度数	スコアの重心					相関比	判別の中率
入所受入	あり	27	-0.430					0.0521	61.0%
	なし	96	0.121						
アイテム	カテゴリー	度数	スコア					レンジ	偏相関
罹災証明	あり	28	0.48					0.621	0.059
	なし	95	-0.141						
水道停止	あり	70	0.0103					0.024	0.002
	なし	53	-0.014						
電気停止	あり	58	-0.018					0.034	0.003
	なし	65	0.0162						
併設施設	あり	81	-0.108					0.318	0.034
	なし	42	0.2092						
職員参集	成功	66	-0.394					1.405	0.141
	どちらともいえない 失敗	33	1.011						
	必要なし	24	-0.306						
周辺住民からの 受入期待度	高い	45	-0.089					0.140	0.014
	どちらともいえない 低い	78	0.0514						
地震マニュアル	あり	58	-0.355					0.672	0.076
	なし	65	0.3171						
福祉避難所協定	あり	67	0.6498					1.427	0.148
	なし	56	-0.777						

福祉避難所の対象者は軽度の要介護度や障害の方とされる場合が多いが、実際は、入所者を同程度の対応をすることもある。また、職員も被災している中、見守り程度あっても福祉避難所対応の職員またはボランティアを確保することは負担となり得る。そういったことが業務量が増えた一因であると考えられる。

入所としての受入の有無（表 9、判別の中率 68.6%）に係わる分析では、「特になし」「健康管理」「避難者受入」「生活用水の確保」「被災職員の補完」「食料確保・提供」と続く。入所として受入れた場合は、「被災職員の補完」が増えるものの、「飲料水の確保」「食料確保・提供」「生活用水確保」「健康管理」といった激震地でより増える業務は増えていない。比較的、通常の業務を継続できた施設で、通常の業務の延長上として入所対応が出来ていると考えられる。任意受入の有無（表 10、判別の中率 70.3%）に係わる分析では、「避難者受入」「食料確保・提供」「報告書作成」が大きな要因として挙げられる。任意受入をした場合は、「避難者受入」に関しては業務量は増えず、入居者、避難者ともに必要「食料確保・提供」、衛生面で必要な「生活用水」、「健康管理」、事務作業として「労務管理」「外部支援活用」について業務量が増えている。

表 6 任意受入有無別にみた避難者受入体制

外的基準	カテゴリー	度数	スコアの重心					相関比	判別の中率
任意受入	あり	24	-0.592					0.0851	63.4%
	なし	99	0.144						
アイテム	カテゴリー	度数	スコア					レンジ	偏相関
罹災証明	あり	28	0.2962					0.383	0.047
	なし	95	-0.087						
水道停止	あり	70	-0.297					0.689	0.078
	なし	53	0.3922						
電気停止	あり	58	-0.147					0.279	0.032
	なし	65	0.1314						
併設施設	あり	81	0.1528					0.448	0.062
	なし	42	-0.295						
職員参集	成功	66	0.4417					1.577	0.204
	どちらともいえない 失敗	33	-1.136						
	必要なし	24	0.3471						
周辺住民からの 受入期待度	高い	45	0.3946					0.622	0.083
	どちらともいえない 低い	78	-0.228						
地震マニュアル	あり	58	-0.109					0.206	0.030
	なし	65	0.097						
福祉避難所協定	あり	67	0.4292					0.943	0.128
	なし	56	-0.513						

表 7 増えた業務

外的基準	カテゴリー	度数	スコアの重心				相関比	判別の中率
受入	あり	87	-0.333				0.283	76.9%
	なし	34	0.851					
アイテム	カテゴリー	度数	スコア				レンジ	偏相関
飲料水確保	YES	64	0.4506				0.957	0.188
	NO	57	-0.506					
食料確保提供	YES	70	-0.325				0.771	0.194
	NO	51	0.4459					
生活用水確保	YES	54	-0.364				0.656	0.128
	NO	67	0.293					
トイレ等介助	YES	43	0.0834				0.129	0.031
	NO	78	-0.046					
健康管理	YES	60	0.1367				0.271	0.072
	NO	61	-0.134					
報告書作成	YES	41	0.2265				0.343	0.082
	NO	80	-0.116					
被害点検	YES	58	-0.323				0.620	0.151
	NO	63	0.2973					
被災職員の補完	YES	45	-0.355				0.565	0.157
	NO	76	0.21					
外部支援活用	YES	27	-0.399				0.514	0.111
	NO	94	0.1146					
労務管理	YES	31	0.4146				0.557	0.132
	NO	90	-0.143					
避難者受入	YES	51	-0.695				1.201	0.328
	NO	70	0.5061					
特になし	YES	13	0.2699				0.302	0.047
	NO	108	-0.032					

4. まとめ

4-1) 福祉避難所

福祉避難所の開設・受入に大きく影響しているのは「福祉避難所協定」があること、「周辺住民からの受入期待度」が高いことであった。「福祉避難所協定」の締結を進めるとともに、周辺住民が避難してくる可能性も視野に入れて福祉避難所の開設・運営手順を具体的に検討することが求められる。

また、福祉避難所を開設した施設では、「避難者の受入」に関する業務量が多大であった。受入が過大となった場合に備えた、福祉避難所対象者の受入先の調整を行うコーディネーターの存在、または平常時から災害時まで施設間連携が行なえるような連携機能が施設内に存在することが重要である。

表 8 福祉避難所開設有無別にみた増えた業務

外的基準	カテゴリ	度数	スコアの重心				相関比	判別の中率
福祉避難所開設	あり	87	-0.768				0.3251	78.5%
	なし	34	0.423					
アイテム	カテゴリ	度数	スコア				レンジ	偏相関
飲料水確保	YES	64	0.2175				0.462	0.102
	NO	57	-0.244					
食料確保提供	YES	70	-0.212				0.503	0.141
	NO	51	0.2913					
生活用水確保	YES	54	-0.146				0.265	0.058
	NO	67	0.1181					
トイレ等介助	YES	43	-0.375				0.581	0.152
	NO	78	0.2066					
健康管理	YES	60	0.2285				0.453	0.133
	NO	61	-0.225					
報告書作成	YES	41	-0.141				0.214	0.056
	NO	80	0.0725					
被害点検	YES	58	-0.137				0.263	0.071
	NO	63	0.126					
被災職員の補完	YES	45	-0.119				0.189	0.058
	NO	76	0.0702					
外部支援活用	YES	27	-0.321				0.414	0.099
	NO	94	0.0923					
労務管理	YES	31	0.5858				0.788	0.204
	NO	90	-0.202					
避難者受入	YES	51	-0.975				1.685	0.474
	NO	70	0.7102					
特になし	YES	13	-0.169				0.189	0.033
	NO	108	0.0203					

表 9 入所受入有無別にみた増えた業務

外的基準	カテゴリ	度数	スコアの重心						相関比	判別的中率
入所受入	あり	27	-0.532						0.0812	68.6%
	なし	94	0.153							
アイテム	カテゴリ	度数	スコア						レンジ	偏相関
飲料水確保	YES	64	0.2155						0.458	0.043
	NO	57	-0.242							
食料確保提供	YES	70	0.3371						0.800	0.097
	NO	51	-0.463							
生活用水確保	YES	54	0.4522						0.817	0.076
	NO	67	-0.364							
トイレ等介助	YES	43	-0.234						0.363	0.041
	NO	78	0.1289							
健康管理	YES	60	0.4983						0.988	0.124
	NO	61	-0.49							
報告書作成	YES	41	-0.223						0.337	0.038
	NO	80	0.1143							
被害点検	YES	58	-0.342						0.656	0.076
	NO	63	0.3145							
被災職員の補完	YES	45	-0.506						0.806	0.107
	NO	76	0.2997							
外部支援活用	YES	27	-0.312						0.402	0.041
	NO	94	0.0897							
労務管理	YES	31	0.1904						0.256	0.029
	NO	90	-0.066							
避難者受入	YES	51	-0.48						0.830	0.113
	NO	70	0.3497							
特になし	YES	13	0.9619						1.078	0.079
	NO	108	-0.116							

4-2) 入所

入所としての受入に大きく影響しているのは、「福祉避難所協定」がないこと、「職員参集」が成功または必要なかったことであった。福祉避難所協定がない場合は、避難者のうち介護度が高い要配慮者は介護保険制度に則った受入を行なっているものと思われる。地震後に増えた業務としては、「被災職員の補完」が増えるものの、「飲料水の確保」「食料確保・提供」「生活用水確保」「健康管理」といった激震地でより増える業務は増えていない。比較的、通常の業務を継続できた施設で、通常の業務の延長上として入所対応が出来ていると考えられる。

表 10 任意受入有無別にみた増えた業務

外的基準	カテゴリー	度数	スコアの重心						相関比	判別の中率
任意受入	あり	27	-0.847						0.1774	70.3%
	なし	94	0.209							
アイテム	カテゴリー	度数	スコア						レンジ	偏相関
飲料水確保	YES	64	-0.014						0.029	0.004
	NO	57	0.0156							
食料確保提供	YES	70	-0.504						1.195	0.221
	NO	51	0.6914							
生活用水確保	YES	54	-0.229						0.413	0.060
	NO	67	0.1844							
トイレ等介助	YES	43	0.5722						0.888	0.155
	NO	78	-0.315							
健康管理	YES	60	-0.375						0.744	0.146
	NO	61	0.3692							
報告書作成	YES	41	0.6704						1.014	0.177
	NO	80	-0.344							
被害点検	YES	58	0.1717						0.330	0.060
	NO	63	-0.158							
被災職員の補完	YES	45	-0.09						0.143	0.030
	NO	76	0.0533							
外部支援活用	YES	27	-0.353						0.454	0.073
	NO	94	0.1014							
労務管理	YES	31	-0.513						0.689	0.121
	NO	90	0.1766							
避難者受入	YES	51	0.6943						1.200	0.249
	NO	70	-0.506							
特になし	YES	13	-0.028						0.031	0.004
	NO	108	0.0034							

4-3) 任意受入

施設の任意で避難者を受入れている施設は、「職員参集」がどちらともいえない・失敗、「水道停止」がありとされていることから、被災が大きい地域に立地している可能性がある。受入れた理由として、「周辺住民からの依頼があった」「ケアマネージャー等から依頼があった」といった受動的な回答もあるが、「法人の理念で地域貢献が挙げられている」「社会福祉法人としてやるべき事と認識している」といった主体的内容も挙げられており、激震地の施設が出来ることとして、任意で場所や食事の提供が行われたと推測される。任意受入の場合、基本的には住民主体の運営が求められるため、「避難者受入」に関しては業務量は増えず、入居者、避難者ともに必要「食料確保・提供」、衛生面で必要な「生活用水」、「健康管理」、事務作業として「労務管理」「外部支援活用」について業務量が増えている。

5. おわりに

福祉避難所について、想定通りの開設には至らなかったことが報道されているが、福祉施設や福祉避難所の協定を締結していた施設等は、通常業務に加えて、様々な形で避難者の受入を行っていた。周辺住民が殺到して本来受入れる予定であった要配慮者が受入れられない状況にならないように考慮する必要はあるが、特に、激震地では一般避難所の過密状態を緩和する点では一定の効果があると考えられる。

今後、立地（人口密度や高齢化率、被災度等）や、避難者の属性（自立や介護度、障害種別等）によって、福祉施設等における避難空間としての機能のあり方を検討していく必要がある。

参考文献

- 朝日新聞：福祉避難所「受け入れ可能」4分の1のみ熊本地震、2016年7月1日記事、
URL: <http://www.asahi.com/articles/ASJ6Y4TBVJ6YTIPE022.html> (2017/4/19 閲覧)
- 狭域防災情報サービス協議会：2016年震度分布図
URL: <http://mmdin1.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=0c70dfed551f42c6a27cb22f59fff3ea>
(2018/2/5 閲覧)

ブロック形状および支持条件がインターロッキング組積造壁の 斜め圧縮試験結果に及ぼす影響

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 古川愛子・増田景也・清野純史

Effect of block shape and supporting condition of interlocking masonry walls
on the results of diagonal compression test

Aiko Furukawa, Keiya Masuda, Junji Kiyono
Kyoto University

要旨：開発途上国で多く建設されている耐震性の低い組積造構造物の地震時の倒壊による人的被害が多く報告されている。そこで、人的被害を軽減することを目的として、新設の組積造構造物に対して、煉瓦同士のインターロッキング（噛み合い効果）を利用した工法が提案されている。噛み合い効果のあるブロック形状としては、I型や波型など様々なものが考えられるが、ブロック形状と耐震性の関係に関する研究はほとんどなされていない。そこで本研究は、インターロッキングブロックの形状が組積造壁の荷重-変位関係および破壊性状に及ぼす影響について検討するために、斜め圧縮試験を行った。また、試験体を載荷治具と接着した場合と接触させただけの場合の2通りを比較し、支持条件の影響についても検討を行った。

1. はじめに

世界の自然災害による死者の約60%は地震により亡くなっており、地震による死者の大多数は開発途上地域に多く建設されている耐震性の低い組積造構造物の倒壊により亡くなっている¹⁾。組積造構造物は煉瓦や石材などを積み上げることで建設され、地震動の揺れに対して非常に脆弱である。しかしながら、材料が安価である点、施工が容易である点、断熱性や保湿性に優れているなどの理由のために、開発途上地域を中心に、今日においても世界中で建設されている。人的被害軽減のためには、組積造構造物の耐震性向上が重要であり、安価で施工容易な組積造構造物の耐震補強方法が望まれている。

組積造構造物の耐震補強方法に関する既往研究としては、鋼棒を用いたもの²⁾、強化繊維プラスチックを用いたもの³⁾、廃タイヤを用いたもの⁴⁾、荷造りで使われるポリプロピレン製の紐であるPP-bandを用いたもの⁵⁾などが提案されている。いずれも材料の引張抵抗に期待するものであり、補強材を要する。経済的な理由で脆弱な組積造構造物が住み続けられていることを鑑みると、耐震補強方法も安価である必要があり、補強材はできるだけ安価であることが望ましい。

補強材を全く用いない組積造構造物の耐震対策に関する研究も行われている。凹凸のある煉瓦同士の噛み合い（インターロッキング）を利用したもので⁶⁾、補強材を用いることなく煉瓦に加工を施すだけで、従来の組積造壁を上回る耐震性能を期待するものである。

真田らは⁶⁾、直方体煉瓦を積み上げた組積造壁とI型煉瓦を積み上げた組積造壁を用意し、面内方向への正負交番載荷試験を行い、インターロッキングによる耐震性向上効果について検討を行った。その結果、I型煉瓦の組積造壁は直方体煉瓦の組積造壁よりも水平耐力が1.5倍以上も上回ることを確認した。

しかし、I型煉瓦の組積造壁では、噛み合い部分に局所的な応力集中が発生し、部材角 1/200 程度以降では大きく耐力が降伏したことも報告している。インターロッキングによる効果は限定であったが、水平耐力の向上には成功したことが報告されている。

木村⁷⁾は、直方体煉瓦から構成される2種類の組積造壁と、「土」および「I」の形状をした凹凸のある煉瓦から構成される2種類の組積造壁、計4種類の組積造壁に対して斜め圧縮試験を実施して、破壊挙動と荷重-変位関係を調べ、凹凸のある煉瓦を用いることで耐力を向上できるかどうかを調べた。その結果、煉瓦同士の噛み合い部分に破壊が生じて、凹凸のある煉瓦の組積造壁の方が耐力が小さくなる傾向が確認された。静的有限要素解析により検討した結果、噛み合い部に応力集中が生じて破壊し易くなっていることがわかった。

以上の問題点を踏まえ、本研究では、凹凸の形状を見直し、応力集中の生じにくい噛み合い形状にすることで耐力を向上できないかと考えた。具体的には、I型煉瓦でも角度を直角でなく鈍角にしたり、砂時計型のようななだらかな形状にすることで、噛み合い効果は低減するものの応力集中を軽減し、耐力を向上できないかと考えた。これを検証するため、I型（直角その1）、I型（直角その2）、I型（鈍角）、砂時計型（直線状）、砂時計型（波状）の5種類のブロックから構成される組積造壁試験体を作成し、斜め圧縮試験を実施し、ブロックの形状によって荷重-変位関係と破壊形態がどのように変化するかを調べる。また、治具と試験体を接着したときと、接触したときの実験結果を比較することで、境界条件が試験結果に及ぼす影響についても分析を行うことを目的とする。

2. 斜め圧縮試験

2.1 試験体概要

(1) インターロッキングを利用した組積造壁

組積造構造物は、直方体の煉瓦をモルタル等の目地材を用いて積み上げるのが一般的である。組積造構造物では一般に、目地で破壊が発生・進展する。直方体の煉瓦では、例えば図1(a)のように目地が破壊すると、摩擦力以外の抵抗を失うため、非常に脆弱な状態となる。組積造構造物の耐力向上策として、凹凸を有する煉瓦を用いて、煉瓦同士の噛み合わせ（インターロッキング）を利用する方法が研究されている。煉瓦が破壊しないと仮定すれば、目地で破壊が生じて、煉瓦同士の噛み合いにより、摩擦力に加えて図1(b)のように抗力が発生する。この抗力により、組積造構造物全体としての耐力を向上できるのではないかと考えられている。

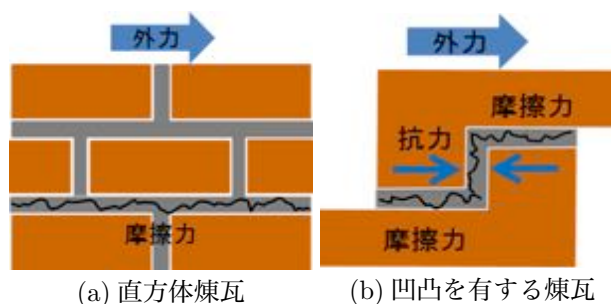


図1 目地破壊後の抵抗力の比較

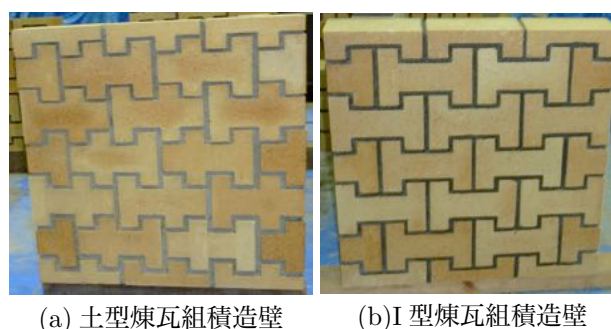


図2 先行研究で用いた組積造壁試験体⁷⁾

(2) 先行研究で明らかになったこと⁷⁾

木村は、図2に示す「土」および「I」の形状をした土型とI型の煉瓦を積み上げた組積造壁と、直方体煉瓦を積み上げた組積造壁の試験体を作成し、斜め圧縮試験を実施した。その結果、直方体煉瓦から構成される組積造壁は主に目地で破壊が生じる

のに対し、土型やI型のように噛み合いのある組積造壁は煉瓦にも破壊が起こり、耐力向上効果を確認できなかった、2次元有限要素解析の結果、噛み合い部分に応力集中が発生し、煉瓦が破壊し易くなっていることが原因であると判明した。

(3) 本研究で用いる組積造壁試験体

本研究では、応力集中の生じにくい形状のブロックを用いることで、耐力を向上できないかと考えた。そこで、図3に示す、I型（直角その1）、I型（直角その2）、I型（鈍角）、砂時計型（直線状）、砂時計型（波状）のブロックから構成される5種類の組積造壁を比較する。組積造壁の寸法はいずれも、高さ18cm、幅18cm、奥行き10cmであり、上段、中段左、中段右、下段の4つのブロックから構成される。ブロックの数が多いと破壊箇所の候補が多くなり現象が複雑になるため、現象を単純化するためにブロックの数は4つとした。

ブロック形状の影響を調べるには、形状以外のばらつき（個々のブロックの物性値・強度のばらつき等）を極力抑える必要があるが、煉瓦の場合は窯のどこで焼かれたかによって物性値や強度がばらつくこと7)がわかったので、煉瓦の代りにモルタルブロックを使用することとし、ブロックの数だけ型枠を作成し、同時に打設し、同じ条件で養生することで、形状以外の差異を抑えるようにした。モルタルの配合は、砂60%、水15%、早強ポルトランドセメント25%とした。また、ブロック同士を目地材で接着する場合は、施工精度によって目地強度がばらつき実験結果に影響を及ぼすため、目地材は用いずに、ブロックを接触させるだけとした。そのため、自立しない直方体ブロックから構成される組積造壁は実験の対象としないこととした。

図3(a)のI型（直角その1）は、Iの形をしたブロックではないが、I型ブロックで構成される組積造壁の一部を切り出したものである。上下段のブロックはIの文字を90度回転させたものを横方向に半分にカットしたもの、中段左右2つのブロックは、Iの文字を90度回転させたも

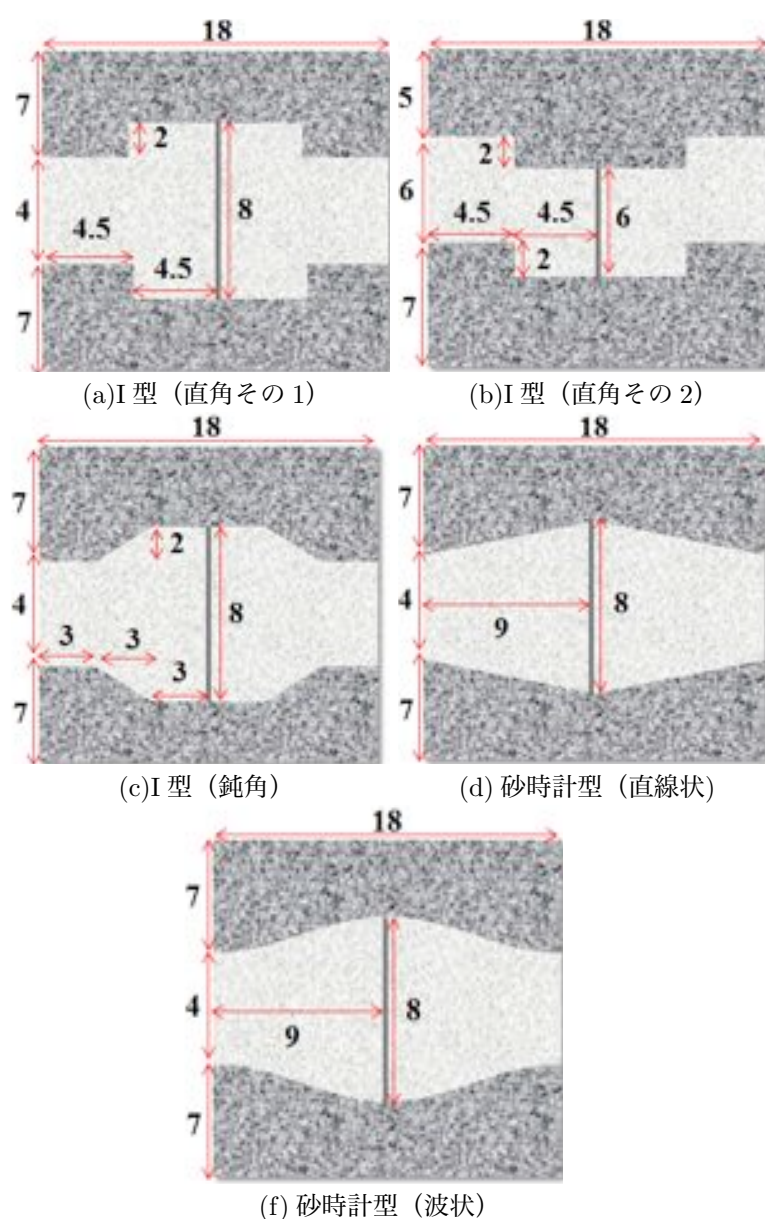


図3 試験体の寸法（単位 cm、奥行きは 6cm）

のを縦方向に半分にカットしたものである。他の試験体についても同様である。砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）の違いは、ブロック同士の界面が直線状か波状かの違いである。波状の形状には $\cos$ 関数を用いた。

(4) 試験体の物性値・強度

斜め圧縮試験の試験体ブロックと同時に打設されたテストピースを用いて要素試験を実施した。表 1 に要素試験結果を示す。

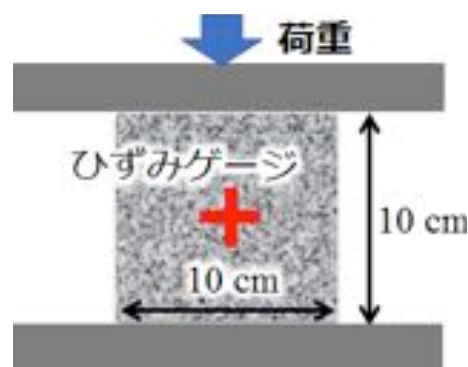
表 1: 要素試験結果

ヤング率 (N/m ²)	ポアソン 比	圧縮強度 (N/m ²)	引張強度 (N/m ²)	摩擦 係数
2.50×10^9	0.216	3.49×10^7	7.434×10^6	0.49

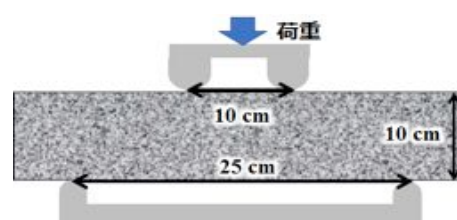
ブロックの弾性係数、ポアソン比、圧縮強度は、幅 10cm、高さ 10cm、奥行き 6cm の直方体ブロックに対する圧縮試験により求めた。載荷重を載荷面積で割ることで応力を求め、ブロックの半分の高さ（5cm）の位置に設置したひずみゲージによって鉛直方向と水平方向のひずみを読み取った。ヤング率は載荷（鉛直）方向の応力－ひずみ関係から、ポアソン比は鉛直方向と水平方向のひずみの比から求めた。圧縮強度は、最大荷重時の応力とした（図 4(a)）。

ブロックの引張強度は、幅 30cm、高さ 10cm、奥行き 10cm のブロックを用いた 4 点曲げ試験により求めた。4 点曲げ試験治具の支点間長さは 25cm、上部の載荷点間隔は 10cm であり、曲げ破壊時の荷重から下縁の引張応力を求め、引張強度とした（図 4(b)）。

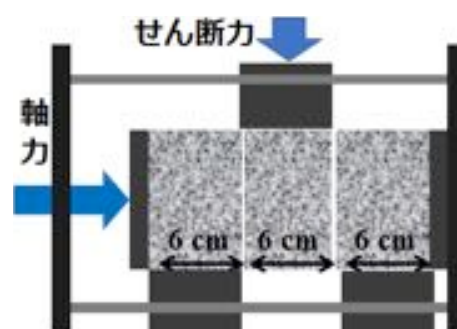
ブロック間の摩擦特性は、2 面せん断試験により求めた。図 4(c) のようにブロック 3 つを水平方向に並べて軸力を与えて固定し、両端のブロックの底面を鋼ブロックで支持した状態で中央のブロックに鉛直荷重（せん断力）を載荷し、滑動が生じたときの直応力とせん断応力を求めた。軸力の大きさを変えて、直応力が約 0.1 (N/mm²)、0.2 (N/mm²)、0.3 (N/mm²) の 3 パターンとなるようにした。滑動時の直応力とせん断応力の関係から最小二乗近似により、摩擦係数 0.49 を得た。



(a) 圧縮試験



(b) 4 点曲げ試験



(c) 2 面せん断試験
図 4 要素試験

2.2 斜め圧縮試験の試験方法

5 種類の組積造壁試験体に対して、斜め圧縮試験を実施し、ブロックの形状によって、荷重－変位関係と破壊挙動がどのように異なるのかを調べた。

試験方法の概略を図 5 に示す。万能材料試験機の上下の載荷版に M 字型の治具を装着し、治具の間に組積造壁を設置した。

M 字型の治具と組積造壁の間の拘束条件は、2 通りとした。今回新たに実施した実験の拘束条件は「接触」であり、治具とブロック間は接しているのみである。これに対して、先に実施した実験の拘束条件 8) は「接着」であり、速乾性のセメントを流し込むことで、治

具の表面全体で組積造壁に荷重を伝達するようにした。なお、全てのブロック間に目地材は使用せず、接しているのみである。

载荷条件は、上端が固定で、下端に $2.5 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ の割合で静的に強制変位を与えた。载荷（鉛直）方向の荷重と変位を計測し、载荷時の挙動をデジタルカメラで撮影した。先に実施した治具と組積造壁の拘束条件が「接着」の実験については、1 台のデジタルカメラを用いて载荷時の挙動の動画を撮影した⁸⁾。今回新たに実施した治具と組積造壁の間の拘束条件が「接触」の実験では、2 台の高速デジタルカメラとデジタルコリレーションシステムを用いた画像計測を実施した。

デジタルコリレーションシステムとは、2 台の高解像度デジタルカメラで被計測物の表面の変形を対象物中の着目点の移動を追跡することによりリアルタイムで記録し、記録されたデータから特殊な画像相関法によって、面外方向の変形も含めた 3 次元変形およびひずみ分布の計測が可能となるシステムである（図 6）。株式会社レーザー計測 Correlated Solutions 社のデジタル 3D コリレーションシステム VIC-3D⁹⁾ を用いた。デジタルコリレーションシステムでは、本研究では、対象物に着目点をつけるために、市販のスプレーで組積造壁にまだら模様に塗布した（図 6 右）。今回実施した試験の回数を表 2 に記す。

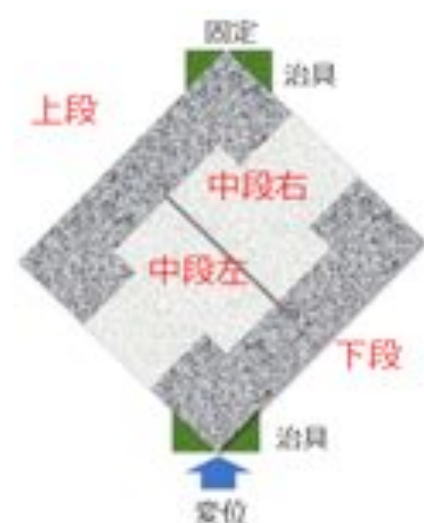


図5 試験方法および境界条件

2.3 試験結果

(1) I 型（直角その 1）

I 型（直角その 1）の荷重-変位関係を「接着」と「接触」とで比較したものを図 7(a) の左に示す。また、図 7(a) の右に、デジタルコリレーションシステムを用いて計測した载荷時の様子を示す。結論から言うと、直角タイプ 1 では、治具と試験体を接着した場合も、接触状態で接着していない場合も、結果にほとんど違いがみられなかった。

直角タイプ 1 の挙動の特徴は、次の通りである。まず、上段と下段のどちらかのブロックに破壊が生じ、荷重が急激に低下した。その後、再び荷重が上昇し、もう片方のブロックに破壊が生じ、荷重がほぼ 0 まで低下するとともに、全体崩壊に至った。接着、接触ともに、荷重-変位関係は 2 つのピークを有し、最初のピークも、2 つ目のピークも、ほぼ同じタイミングで生じた。「接着」の破壊時の写真は示していないが、「接触」とほぼ同じ位置に No.1, No.2 とともに亀裂が生じた。

「接触」のケースのみ、デジタルコリレーションシステムを用いて計測を実施している。デジタルコリレーションシステムを用いた計測結果は、水平方向ひずみの大きさを色の濃淡で示している。色が赤色になっている箇所は、大きな水平方向ひずみが生じている地点であり、大きな水平方向ひずみが生じ

表 2: 斜め圧縮試験の試験数 (*は先行研究の成果⁸⁾)

	接着	接触
I 型（直角タイプ 1）	2 体*	1 体
I 型（直角タイプ 2）	2 体	1 体
I 型（鈍角）	2 体*	1 体
砂時計型（直線状）	2 体*	2 体
砂時計型（波状）	2 体*	2 体



図6 試験方法および境界条件

た後に、破壊が生じた。上段、下段のブロックは、ポアソン効果により圧縮力に直交する方向に生じた引張りひずみにより、引張破壊したものと推察される。また、中段の左右のブロック間には、摩擦が生じて相対変位が生じていることも確認できる。

直角タイプ1では、「接着」と「接触」とで結果にほとんど違いが見られなかったが、この理由は、ブロック同士の噛み合いが強いため、治具と試験体の間の接着条件の影響を受けにくいのではないかと推察される。

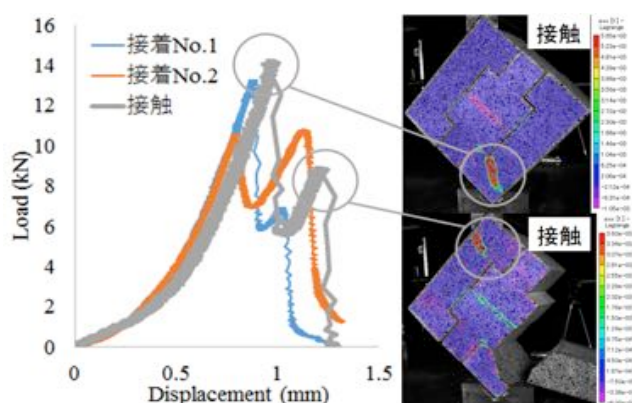
(2) I 型（直角その 2）

I 型（直角その 2）の荷重-変位関係を「接着」と「接触」とで比較したものを図 7(b) の左上に示す。また、図 7(b) の右に、デジタルコリレーションシステムを用いて計測した載荷時の様子を示す。

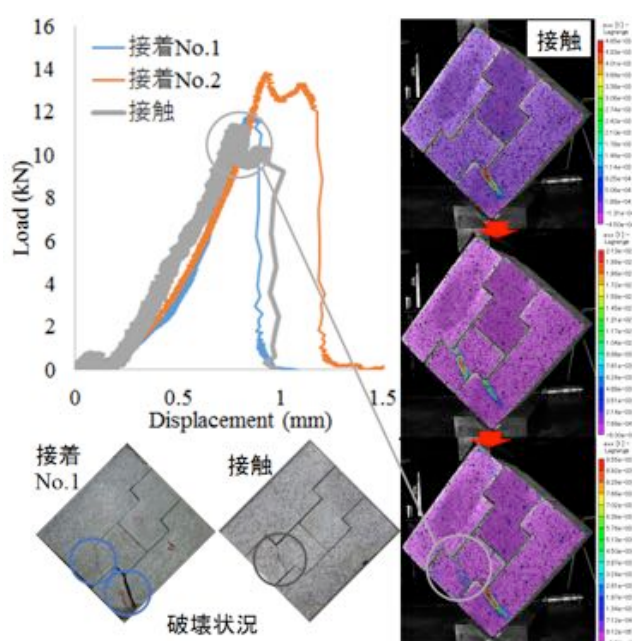
図 7(b) 左下は、接着 No.1 と接触の試験体の破壊状況の比較である。接着 No.2 の破壊状況は、接着 No.1 とほぼ同じであるため、図示を省略する。

荷重-変位関係に関しては、「接着」と「接触」とで違いが見られなかった。I 型（直角その 1）ではピークが 2 つ見られたのに対して、I 型（直角その 2）ではピークは 1 つとなった。破壊状況に関しては、「接着」と「接触」とで違いが見られた。接着の場合、図 7(b) のように、まず最初の下段のブロックに大きな水平方向ひずみが生じた（右上の図）。しかし、下段ブロックは破壊せず、次に中段右のブロックに水平方向ひずみが生じ始めた（右中の図）。最終的に、中段右のブロックに破壊が生じ、全体崩壊に至った。下段ブロックには大きなひずみが生じたが、破壊しなかった。

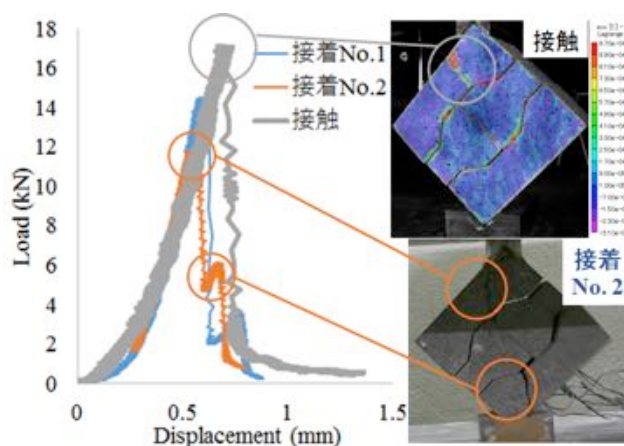
これに対して「接触」は、2 体とも、左下の図のように、中段右だけでなく下段のブロックにも破壊が生じた。先に中段右に破壊が生じたが、供試体が治具に接着されているため、中段右ブロックの破壊だけでは全体崩壊に至らず、下段ブロックの破壊によって全体崩壊に至った。これに対して、「接触」の場合は中段が破壊した段階で、試験体が不安定になり全体崩壊に至った。このように、破壊の発生状況は「接着」と「接



a) I 型（直角その 1）



b) I 型（直角その 2）



c) I 型（鈍角）

図 7 斜め圧縮試験の荷重-変位関係および破壊状況

触」で異なることが確認できた。

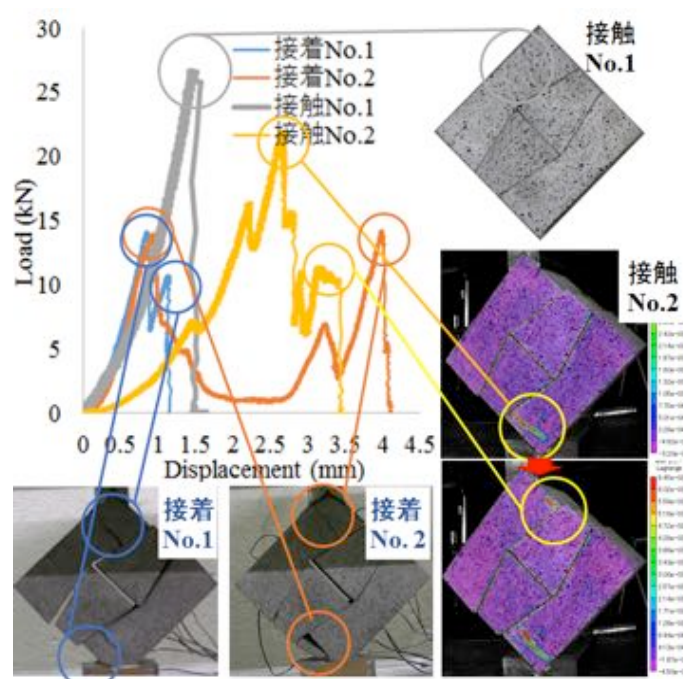
このように、「接着」と「接触」は破壊メカニズムが異なることがわかったが、荷重－変位関係は似た形となった。この理由としては、「接着」において中段右がひとたび破壊すると、噛み合いによる抵抗がなくなり、下段の破壊が引き続いて生じるため、すなわち、中段右の破壊から下段の破壊までが連続して起こるためであると推察される。

(3) I 型（鈍角）

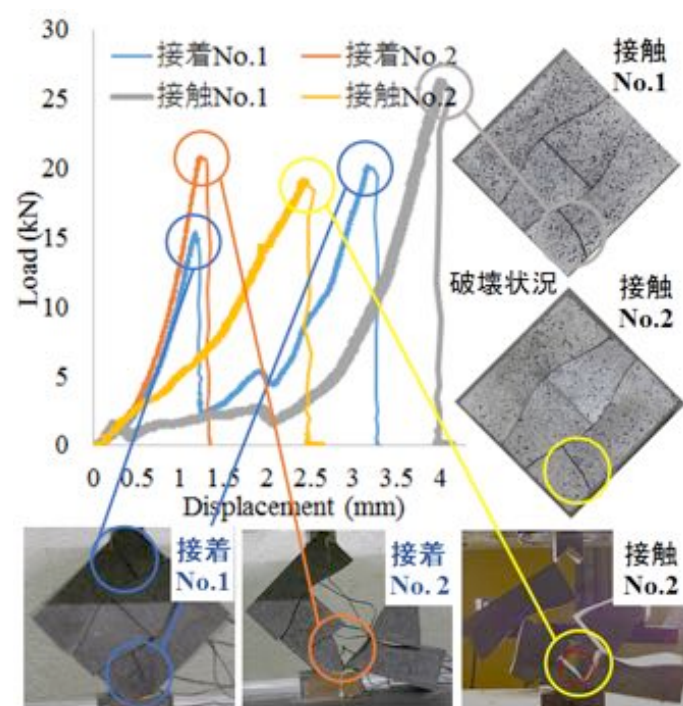
I 型（鈍角）の荷重-変位関係を「接着」と「接触」とで比較したものを図 7(c) の左上に示す。また、図 7(c) の右上は接触についてデジタルコリレーションシステムを用いて計測した結果である。左下は、接着 No.2 の破壊状況である。接着 No.1 については、接着 No.2 と同様の結果であったため、図示を省略する。

「接着」は、No.1 と No.2 の 2 体とも、上段と下段の 2 つのブロックが破壊した。まず最初に、上段または下段のいずれかが破壊する直前に荷重は最大値に達し、破壊が生じたときに荷重が一気に低下した。その後、再び荷重が増加してすぐに、もう片方のブロックが破壊して、荷重はほぼ 0 まで減少し、全体崩壊に至った。荷重-変位関係は 1 つ目の大きなピークと、2 つ目の小さなピークの、2 つのピークを持つおとがわかった。これに対して、「接触」の場合は、上段のブロックに破壊が生じたときに不安定となって全体崩壊が生じた。これは、上段ブロックと上側治具の間、下段ブロックと下側治具の間が接着されていないため、ひとたび上段ブロックに破壊が生じると不安定になるためである。このため、荷重-変位関係はピークが 1 つだけとなった。

I 型（直角その 1）のときは、「接着」と「接触」とで結果に違いがほとんど見られず、上段と下段それぞれの破壊によって全体崩壊に至ること、「接着」と「接触」いずれも明瞭な 2 つのピークを有する荷重-変位関係となった。これに対して、より噛み合い効果の弱い I 型（鈍角）では、「接着」の場合には荷重-変位関係が 2 つのピークを持つものの第 2 ピークが小さく、そして「接触」の場合はピークが 1 つしかない荷重-変位関係となることがわかった。このように、噛み合い効果が弱い



d) 砂時計型（直線状）



e) 砂時計型（波状）

図 7 続き

ほど、境界条件の影響を受けやすいことがわかった。

(4) 砂時計型（直線状）

砂時計型（直線状）の荷重-変位関係と破壊状況を図 7(d) に示す。接触 No.1 については破壊状況を写真で示している。

「接着」の場合は No.1, No.2 の 2 体とも、上段と下段の 2 つのブロックの破壊によって全体崩壊に至った。噛み合い効果が小さいため、接着 No.1 の場合は、上段下段それぞれの破壊に対応する 2 つのピークを有する荷重-変位関係となった。接着 No.2 の場合は、先に下段のブロックが破壊した後、ブロック間で滑動し、その後再び安定状態に達して荷重が増加し始め、下段ブロックの破壊によって全体崩壊に至った。接着 No.2 が接着 No.1 に比べて変位が大きくなった理由は、試験体の噛み合い程度の差が生じたと推察している。試験体には施工による差が 1mm 程度存在するため、噛み合い効果の小さい砂時計型（直線状）では、接着 No.2 に大きなすべりが生じてしまったと推察される。「接触」の場合は、接触 No.1 は上段ブロックに破壊が生じたと同時に全体崩壊に至り、荷重-変位関係のピークは 1 つとなった。接触 No.2 は、先に下段に大きな水平方向ひずみが生じて破壊したが、全体崩壊に至らなかった。この理由として、下段ブロックに破壊が生じた位置が、治部の内部であったために、治部から圧縮力を受けることによって、破壊面の両側のブロックが安定したためと考えられる。その後、上段ブロックの破壊によって、全体崩壊に至った。

以上から、砂時計型（直線状）では、接着の場合は上段と下段ブロックそれぞれの破壊によって全体崩壊に至るため、荷重-変位関係が 2 つのピークを持つこと、また、噛み合い効果が小さいためブロック間で滑動し易く変位が大きくなる傾向が見られた。接触の場合は、基本的には上段または下段の破壊によって全体崩壊に至ることがわかった。破壊面が治部の範囲内で生じた場合は、接着と同様の効果により、上段と下段 2 つのブロックの破壊によって全体崩壊に至ることがわかった。

(5) 砂時計型（波状）

砂時計型（波状）の荷重-変位関係と破壊状況を図 7(e) に示す。破壊状況は写真で示している。

荷重-変位関係を比較すると、ピークが 2 つあるのは「接着」の No.1 のみで、それぞれのピークは上段と下段のコンクリートの破壊に対応している。「接着」No.2 は、下段が破壊したタイミングで、上段ブロックが上側治具に接着したまま崩壊したため、ピークは 1 つとなった。「接触」については、No.1 と No.2 とも下段の破壊により全体崩壊に至り、ピークは 1 つとなった。変位にばらつきが大きいのは、噛み合い効果が小さいためブロック間で滑動が起きやすいためと考えられる。

(6) まとめ

噛み合い効果の最も大きい I 型（直角タイプ 1）の荷重-変位関係は、接着と接触とで似た傾向となり、2 つのピークのある形となった。それぞれのピークは、上段と下段ブロックの破壊に対応している。I 型（直角タイプ 1）よりは噛み合い効果の劣る I 型（鈍角）では、接着の場合は上段と下段の 2 か所の破壊によって全体崩壊に至ったため、荷重-変位関係に 2 つのピークが見られたが、2 つ目のピークは 1 つ目のピークに比べると非常に小さいものとなった。接触の場合は、上段の破壊によって全体崩壊に至ったので、ピークは 1 つとなった。ただし、接触の 2 つ目のピークは小さいため、荷重-変位関係は接着・接触とで大きく異なるものとなった。これに対して、噛み合い効果の小さい砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）の荷重-変位関係は、接着と接触の結果が異なるだけでなく、同じ接着同士・

接触同士でも 2 体の結果が異なった。これは、噛み合い効果が小さいために、試験体製作時のわずかな誤差によって噛み合い効果に差が生じるためと考えられる。

以上のことから、噛み合い効果が小さいほど、境界条件や、試験体の寸法誤差により性能が大きく異なる可能性のあることがわかった。

次に表 3 に、各試験体の最大荷重の比較を示す。表 3 より、各モデルの最大荷重の平均値を比較すれば、接着の場合は「I 型（直角タイプ 1）＜I 型（鈍角）＜I 型（直角タイプ 2）＜砂時計型（直線状）＜砂時計型（波状）」となり、接触の場合は「I 型（直角タイプ 2）＜I 型（直角タイプ 1）＜I 型（鈍角）＜砂時計型（波状）＜砂時計型（直線状）」となった。噛み合い効果の小さいほど、最大荷重が大きくなる傾向が見

表 3 斜め圧縮試験による最大荷重 (kN)

モデル	接着		接触	
	No.1	No.2	No.1	No.2
I 型（直角タイプ 1）	13.2	10.8	14.10	—
I 型（直角タイプ 2）	12.12	14.16	11.02	—
I 型（鈍角）	14.5	11.9	17.07	—
砂時計型（直線状）	14.2	14.2	25.98	21.25
砂時計型（波状）	20.2	20.8	25.57	18.48

られた。また、同じタイプを接着と接触とで比較すると、I 型（直角タイプ 2）を除く 4 モデルが「接着＜接触」となった。なぜ I 型（タイプ 2）のみ「接触＜接着」となったのか、ばらつきによるものなのか、理由の解明には至っていないが、全体的に、接触の方が荷重の小さい傾向が見られた。接着より接触の方が、拘束がない分だけ噛み合い効果も低減されると思われるので、噛み合い効果が小さいほど応力集中も起こりにくいので、最大荷重が大きくなるのではないかと推察する。

3. 結論

本研究では、インターロッキングブロックの形状および組積造壁の支持条件が、組積造壁の荷重－変位関係や破壊挙動に及ぼす影響を調べるために、斜め圧縮試験を実施した。インターロッキングブロックの形状としては、I 型（直角その 1）、I 型（直角その 2）、I 型（鈍角）、砂時計型（直線状）、砂時計型（波状）の 5 種類を考えた。得られた知見は以下の通りである。

- I 型（直角その 1）、I 型（直角その 2）、I 型（鈍角）は噛み合い部分の角から破壊が生じること、砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）は噛み合い効果が小さいためブロック間で滑動し易く変位が大きくなる傾向が見られた。噛み合い効果の小さい形状のブロックの方が、最大荷重が大きくなる傾向が確認できた
- 噛み合い効果の大きい I 型（直角その 1）、I 型（直角その 2）、I 型（鈍角）の荷重－変位関係は接着・接触とで大きく異ならないこと、噛み合い効果の小さい砂時計型（直線状）と砂時計型（波状）の荷重－変位関係は、接着と接触の結果が異なるだけでなく、同じ接着同士・接触同士でも 2 体の結果が異なった。噛み合い効果が小さいほど、境界条件や、試験体の寸法誤差により性能が大きく異なる可能性のあることがわかった。

本研究では斜め圧縮試験を実施したが、今後は、地震時に組積造壁が受ける荷重をより模擬した載荷方法による試験を実施して、インターロッキングの効果を検証したいと考えている。また、直方体ブロックとインターロッキングブロックを比較することで、インターロッキングブロックを用いた耐震対策の可能性について検討を行いたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K06178 の助成を受けたものです。デジタルコリレーションシステムを用いた計測にあたっては、京都大学インフラ先端技術共同研究講座の塩谷先生、西田先生、麻植先生、橋本先生にご指導及びご協力を頂きました。深く御礼申し上げます。

参考文献

1. OCHA (Office for the Coordination of Humanitarian Affairs) , <http://www.unocha.org/>, 2015.
2. A. Darbhanzi, M.S. Marefat, M. Khanmohammadi : Investigation of in-plane seismic retrofit of unreinforced masonry walls by means of vertical steel ties. *Construction and Building Materials*, **52**, 122 – 129, 2014.
3. Giancarlo Marcari, Gaetano Manfredi, Andrea Prota, Marisa Pecce : In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP. G. Marcari et al. / *Composites: Part B* 38, 887 – 901, 2007.
4. Ahmet Turer, Mustafa Golalm : *Scrap tire as low-cost post tensioning material for masonry strengthening. Materials and Structures*, **41**, 1345-1361, 2011.
5. 櫻井光太郎, Navaratnarajah SATHIPARAN, 目黒公朗 : PP-band 工法による石積み組積造壁の耐震補強に関する実験的研究, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 3-0053, 2009.
6. 真田靖士, 中村友紀子, 山内成人, 崔琥, 中埜良昭 : 枠組組積造壁の水平力抵抗機構から推察される無補強組積造建築の高耐震化技術, 日本建築学会論文集, 第 605 号, 159-166, 2006.
7. 木村翔汰 : インターロッキング機構を利用した組積造壁の耐震性に関する研究, 京都大学大学院修士論文, 2015.
8. 古川愛子, 増田景也, Gerry Tri Satya Daru, 清野純史 : インターロッキングブロックの形状が組積造壁の荷重-変位関係および破壊挙動に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.64A, 2018.
9. 株式会社レーザー計測 : デジタル 3D コリレーションシステム VIC-3D, <http://www.laser-measurement.com/product/correlated/vic3d.html> (2018 年 2 月 10 日閲覧)

鳥取県気高地域における微動観測に基づく地盤構造推定

鳥取大学工学部 野口 竜也・久野 雅幸・上野 太士・中井 翔・香川 敬生

Determination of Subsurface Structure by Microtremor Observation
in the Ketaka Area, Tottori Prefecture, Japan

Tatsuya Noguchi, Masayuki Kuno, Hiroshi Ueno,
Sho Nakaiakao and Takao Kagawa
Tottori University

Abstract

In this study, subsurface structures were determined and we grasped characteristics of ground motion by microtremor survey in the Ketaka area, Tottori Prefecture. Microtremor single-point 3-components observations and array observations were carried out at 195 and 7 sites respectively. As analysis of microtremor surveys data, we determined S-wave velocity structures by using phase velocities obtained from array observations and predominant periods of H/V spectrum obtained from single-point 3-components observation records. Further, we estimated amplification factors of site amplification effects based on predominant periods of H/V spectrum.

1. はじめに

本研究の対象地域である鳥取県鳥取市気高町・鹿野町は、鳥取県の東部に位置し、浜村温泉や鹿野温泉、鹿野城下町の街並み保全地区などの観光地がある。これらの観光地を中心に住宅が集中しており、市役所の支所や小学校、公民館などの公共施設も集まっている。また、1943 年の鳥取地震で鹿野町の市街地、気高町の浜村温泉街では甚大な被害が発生しており、被害状況に地域性がみられ、地盤増幅による影響が示唆される。よって、対象地域は地震防災上重要な地域であり、地震動予測に基づく被害想定等を行う必要がある。地震動予測を行うためには、地盤構造の情報が不可欠である。この地域では既往の研究¹⁾で物理探査が実施されており、地盤構造が推定されている。本研究では既往の観測地点を補間するように微動観測を追加して行い、対象地域の地盤震動特性と地盤構造をより詳細に把握した。

2. 観測および解析

地盤の単点 3 成分観測では 3 成分加速度計を用いて既往の観測点間を補間するように 200 ～ 500m 程度の測点間隔で 163 点、また浜村駅前ではより稠密に 50m 間隔で 32 点の観測を実施した (図 1)。アレイ観測では単点観測と同じ機器を正三角形と重心配置し地震計間隔は 0.6 ～ 30m として 7 地点 (浜村地区; SBR, HST, HSS, SSM, 鹿野地区; IMC, TJN) で実施した。なお、以下の解析では既往の観測結果¹⁾も含めている。解析については、3 成分単点観測記録からは水平動と上下動のスペクトル比 (H/V) を求め、卓越周期を読み取った。

アレイ観測記録からは、CCA 法³⁾、Nc-CCA 法⁴⁾、V 法⁴⁾、SPAC 法⁵⁾により位相速度分散曲線を求め、H/V と位相速度分散曲線を用いたフォワードモデリングにより S 波速度構造を推定した。各半径で位相速度を求める際に用いた手法について、主として CCA 法の結果を用いたが、一部の地点で CCA 法の結果のみでは分散曲線が十分に得られず、半径毎の分散曲線が連続しない場合があり、その場合は V 法、SPAC 法で得られた結果を採用した。これは、観測時の設置条件や微動の震動特性により、SPAC 法、V 法では円の中心のデータを利用することで安定的に位相速度が得られる場合もあると推測される。位相速度分散曲線が 100 ～ 400m/s の範囲で得られたことから、その範囲では $V_s=500\text{m/s}$ 層までの堆積層の速度および層厚、それより深部の構造については既往の結果^{1),2)}より速度を決め、H/V を用いて層厚を調整するという手順で推定した。

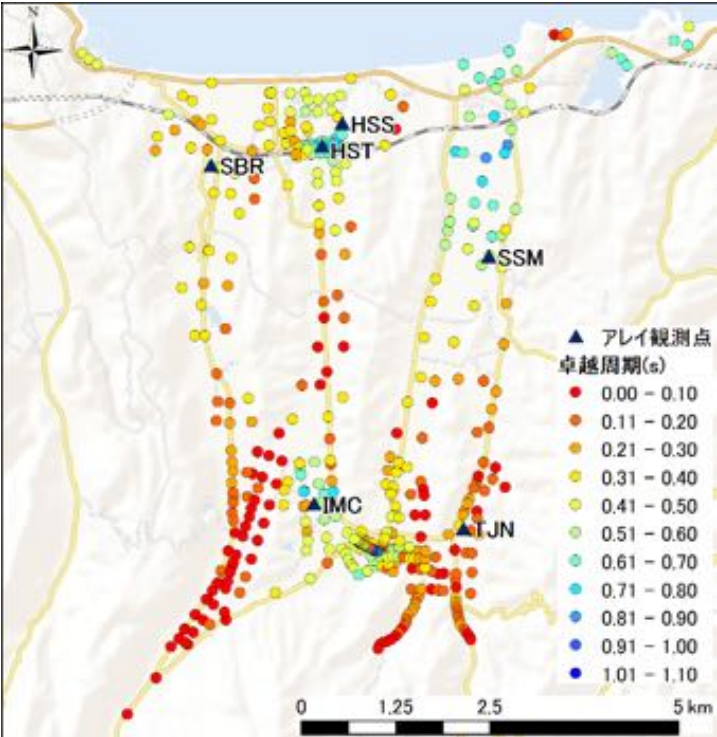


図1 H/V の卓越周期分布

表1 地盤構造モデル

HST				HSS			
層厚 (m)	ρ (t/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	層厚 (m)	ρ (t/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
13	1.6	1390	90	13	1.6	1400	100
10	2	1845	500	10	1.7	1600	300
80	2.1	2180	800	8	2	1845	500
100	2.2	2955	1500	30	2.1	2180	800
∞	2.3	4065	2500	100	2.2	2955	1500
				∞	2.3	4065	2500
SBR				SSM			
層厚 (m)	ρ (t/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	層厚 (m)	ρ (t/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
3.8	1.9	1400	100	13	1.8	1400	100
12	2	1845	500	30	2.1	2180	800
30	2.1	2180	800	150	2.2	2955	1500
120	2.2	2955	1500	∞	2.3	4065	2500
∞	2.3	4065	2500				
MC				TJN			
層厚 (m)	ρ (t/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	層厚 (m)	ρ (t/m ³)	V_p (m/s)	V_s (m/s)
2.6	1.8	1400	100	3	1.6	1380	80
20	2	1570	250	5	2	1510	200
10	2.2	1845	500	15	2.1	1845	500
30	2.4	2180	800	20	2.2	2180	800
100	2.5	2955	1500	60	2.3	2955	1500
∞	2.6	4065	2500	∞	2.4	4065	2500

鳥取県において微動の卓越周期とサイト特性の関連性が検討されており¹⁾、サイト特性の指標：G と微動 H/V の卓越周期： T_p について、次式の関係式が得られている。

$$\log G = a + b \log T_p \quad (1)$$

そこで、(1) 式を用いて地盤増幅度の指標を求めることとする。なお、地盤増幅度の指標としては、微動の卓越周期と相関係数が比較的高かった地盤増幅度（PGV）（ $a:0.55$, $b:0.30$ ）¹⁾ について、微動観測点における地盤増幅度の指標を求めた。

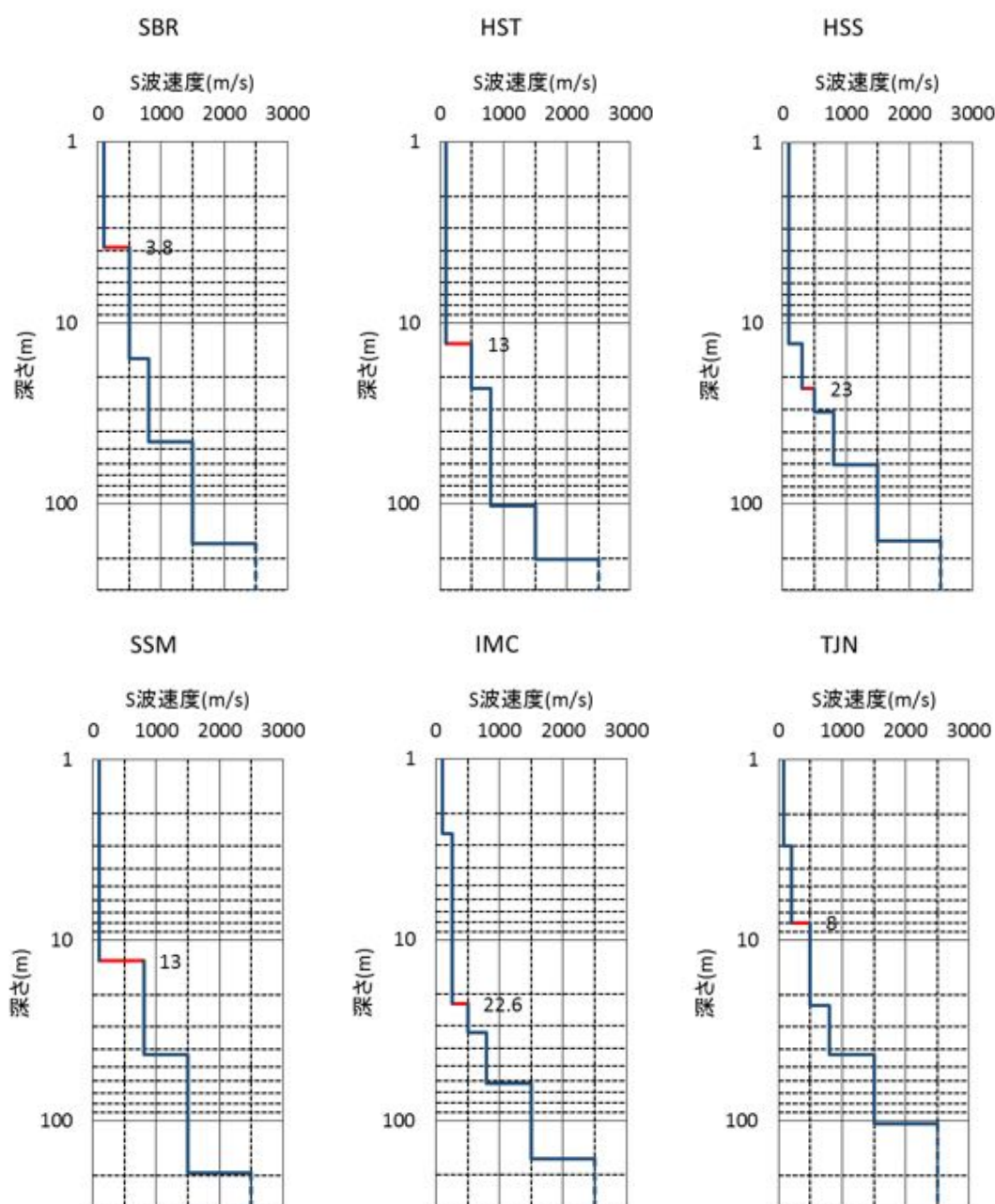


図2 S波速度構造モデル

3. 全域の地盤震動特性と地盤構造

H/V の卓越周期の分布 (図 1) をみると, 0.05 ～ 1.1 秒の範囲であり, 内陸に行くほど周期が短くなる傾向が見られるが, 海岸部や東側の谷筋, 内陸の鹿野市街地付近で周期 1 秒近くの長周期の領域がみられる。地盤構造モデル (表 1) より何れの地点でも $V_s=100\text{m/s}$ 程度の軟弱層が最大で 10m 程度存在することがわかる。S 波速度構造モデル (図 2) より, 工学的基盤 ($V_s=500\text{m/s}$ 層) までの層厚 (図 2 の赤線の境界; 数値は層厚) は最大で 20m 程度であることがわかる。

H/V の卓越周期が S 波速度構造モデルより工学的基盤までの層厚にほぼ対応していることから, $1/4$ 波長則 ($H=T \cdot V/4$; H : 層厚, T : 卓越周期, V : 表層の S 波速度) を用いて表層厚を推定した。このとき表層の S 波速度について, 最寄りの S 波速度構造モデルが得られている地点の結果を用いることとし, 1 層目の値, もしくは 2 層目までの層厚による重み付き平均の値を用いた。層厚分布 (図 3) をみると, 数 m ～ 40m 程度の厚さで分布してしおり, 海岸部ほど層厚が厚くなる傾向がみられ, また層厚 20m 以上の領域は周期 1 秒程度の長周期領域に対応している。

気高町総合支所 (HSS) には震度計が設置されており, 地震記録によって得られたサイト増幅特性²⁾ (観測値) が得られている。今回得られた $V_s=500\text{m/s}$ 層までと既往研究²⁾ の深部地盤の構造を組み合わせたモデルから得られる SH 波伝達関数 (理論値) を求めた。サイト増幅特性と SH 波伝達関数を重ねて図 4 に示す。この図より卓越周波数の 2Hz 付近は概ね一致しており堆積層の地盤モデルは妥当であると考えられる。また, 卓越周波数が 2 ～ 3Hz (卓越周期 0.3 ～ 0.5 秒) であることは, 木造建物の固有周期 (0.3 ～ 0.4 秒) に近く, 地震時に共振により損傷する可能性が高いと考えられる。

H/V の卓越周期による地盤増幅度 (PGV) の分布 (図 5) から, 海岸に近い浜村地区や内陸の鹿野地区で地盤増幅度が大きくなる地域があり 2.5 を超えている。また, SSM より北側, HST 周辺, IMC 周

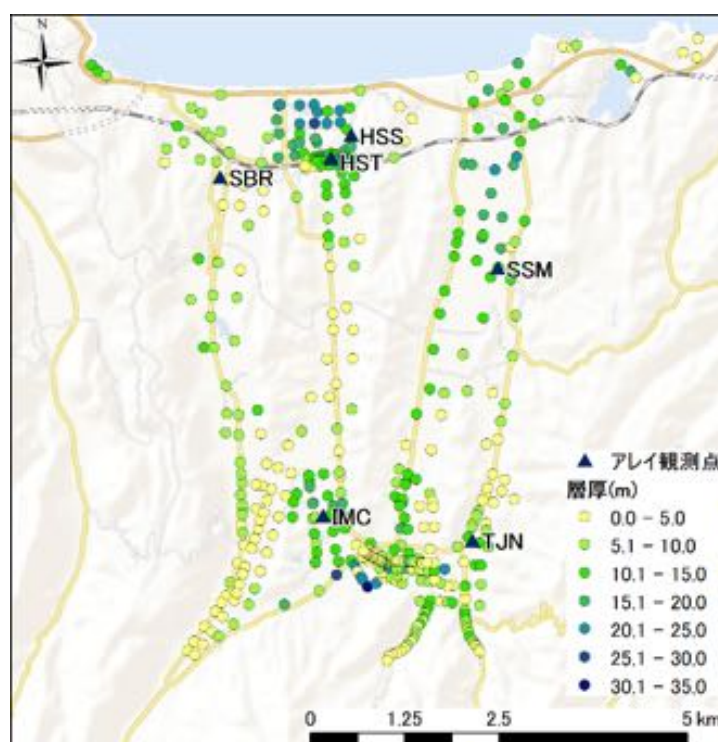


図3 表層の層厚分布

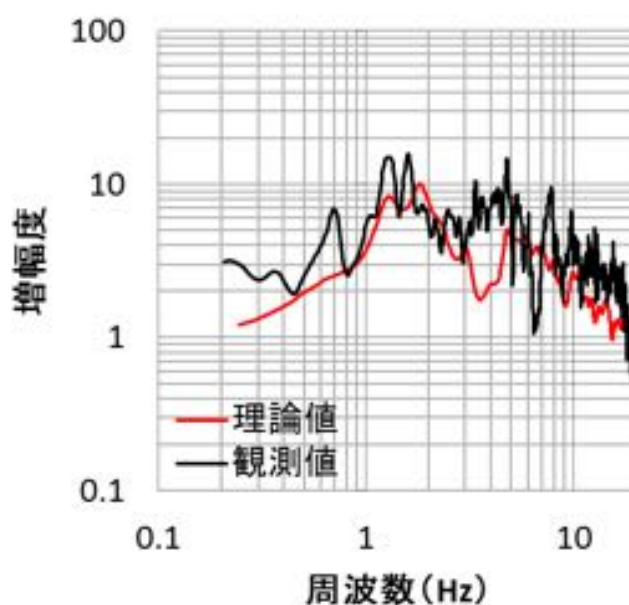


図4 北高支所のサイト特性

辺で地盤増幅度が3を超えるような大きい領域がみられる。地盤増幅度の大きい領域は住宅集中している地域でもあり、地域住民の防災意識の向上と地震対策の普及が求められる。

4. 浜村駅周辺の地盤震動特性と地盤構造

浜村駅前では1943年鳥取地震で局所的に被害が出ており、その要因について検討する。浜村駅周辺の卓越周期分布（図6）より、線路沿いの約1kmの東西の範囲では、西側から東側にかけて周期が長くなり、西側では0.3～0.4秒、東側では0.6～0.8秒に変化していることがわかる。地盤増幅度の分布（図7）より、浜村駅周辺では地盤増幅度が2.5を超えており、特にHSTの周辺では3を超える領域となっている。浜村駅前（HST）のS波速度構造モデルからは、第1層が $V_s=90\text{m/s}$ と低速度であることから、この地域全域で地盤増幅が強く影響し、さらに地盤の卓越周期と当時の木造建物の固有周期との関連で、選択的に被害が生じた可能性がある。

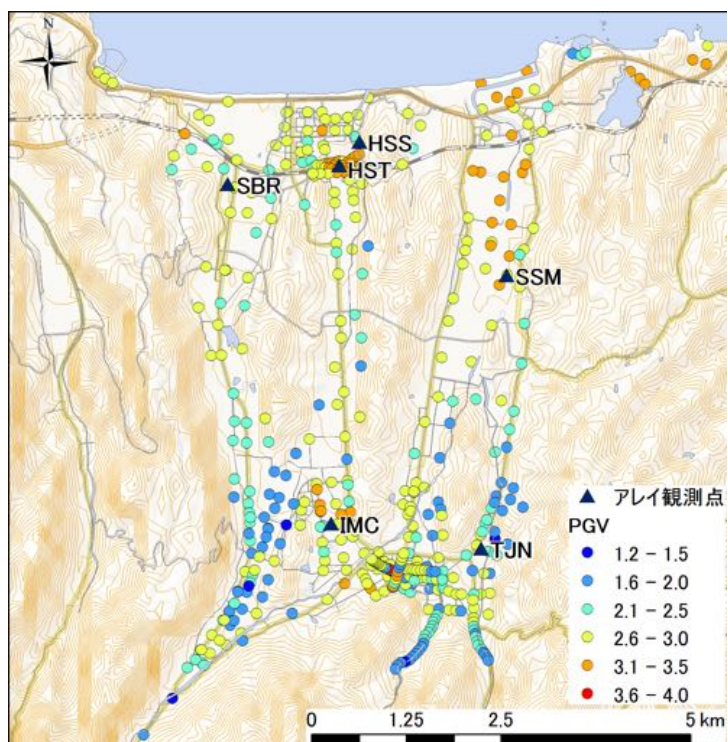


図5 地盤増幅度 (PGV) の分布

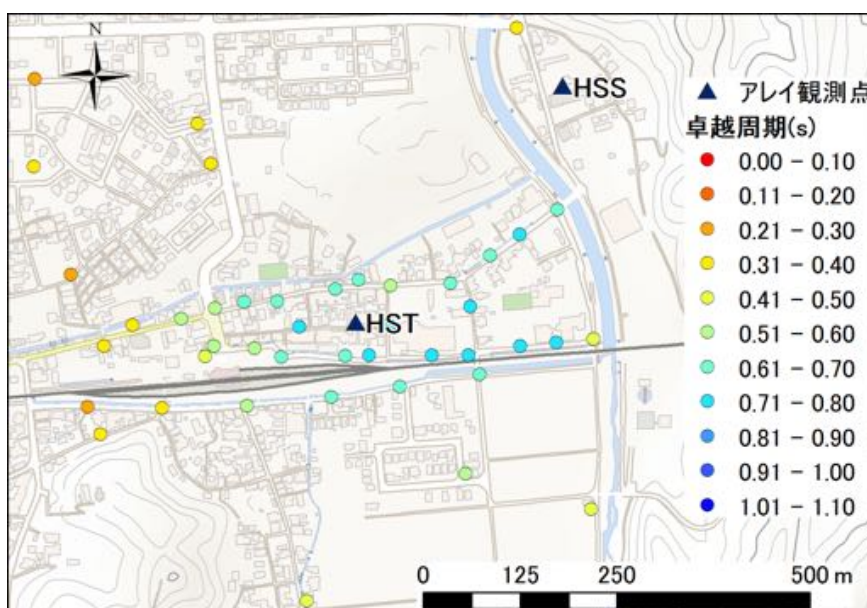


図6 浜村駅周辺の卓越周期分布

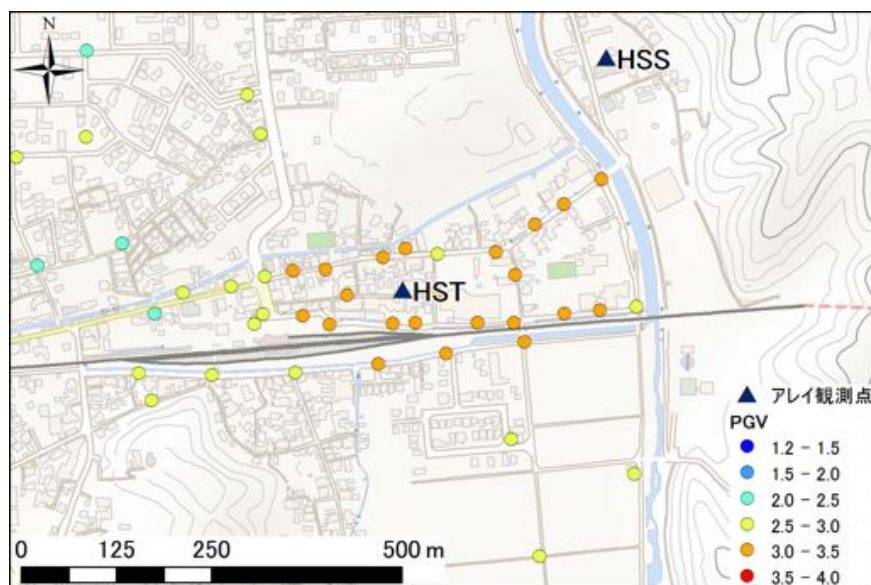


図7 浜村駅周辺の地盤増幅度 (PGV) の分布

5. まとめ

鳥取県気高地域における微動観測に基づき地盤構造を推定した結果、以下のことがわかった。

- 微動 H/V の卓越周期は 0.05 ～ 1.1 秒の範囲であり、内陸に行くほど周期が短くなる傾向が見られ、周期 1 秒程度の長周期の領域が各所にみられた。S 波速度構造は $V_s=100\text{m/s}$ 程度の軟弱層が最大で 10m 程度、工学的基盤までの層厚は最大で 20m 程度であった。
- 微動 H/V の卓越周期に基づき地盤増幅度 (PGV) を求めたところ、住宅が集中する地域の多くで、地盤増幅度が 3 を超えることがわかった。
- 鳥取地震の際、浜村駅前において建物被害が局所的に発生した要因として、地盤卓越周期の変化と軟弱地盤による地盤増幅が複合的に影響したことが示唆された。

参考文献

1. 野口竜也, 西川隼人, 吉田昌平, 香川敬生; 鳥取県内の地震観測点における地盤構造の把握とサイト特性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.72, No. 4, [特] 地震工学論文集, Vol.35, p.I __ 646-I __ 658, 2016.
2. 野口竜也, 上野太士, 西川隼人, 吉田昌平, 香川 敬生, 鳥取県鹿野地域の地盤構造および地盤震動特性, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol.73, No. 4, [特] 地震工学論文集, Vol.36, p. I __ 894-I __ 906, 2017.
3. Cho I., Tada T. and Shinozaki Y.: Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor record, J. Geophys. Res. 111, B09315, doi:10.1029/2005JB004235, 2006
4. Tada, T., I. Cho and Y. Shinozaki, Beyond the SPAC method: exploiting the wealth of circular-array methods for microtremor exploration, Bull. Seism. Soc. Am., 97, 2080-2095, doi:10.1785/0120070058, 2007.
5. Aki, K. :Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull.Earthq.Res.Inst., 35, pp415 456, 1957.

災害リスクの構造と工学的制御の方法^{*1}

北海道大学大学院工学研究院 建築都市空間デザイン部門
都市防災学研究室 岡田成幸

Structure of Disaster Risk, and Engineering Technology for Protection

Okada Shigeyuki
Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract

This paper discusses the essential characteristics of seismic disaster. The characteristics are summarized by K. Takahashi, who is one of famous meteorologists, as follows: Natural disaster is characterized by “abnormality” with regard to the magnitude of the disaster, “accidentality and concentration” with respect to the occurrence time of the disaster, “localities and multiple occurrences” about the place of disaster occurrence, and “recurrence and immunity” about the frequency of disaster repetition. In addition, I point out “inequality” in disasters and will assert sharing equal risks to the people as a goal of anti-disaster policy.

1. はじめに

地震を主とした自然災害について、稿を起す。我々は災害から逃れるべく対策を種々講じてきている。いにしえにおいては、災害のメカニズムが計り知れなく、天に祈る儀式が唯一の対策の方途の時代もあった。時が過ぎ、経験を積み、我々も次第に合理的な対策手法を身につけてきた。しかし、災害が持つその本質的性質により未だ災害を克服できたと言えるレベルには達していない。災害の何が対策を難しくしているのだろうか。そもそも災害は我々に克服できる代物なのであるだろうか。仮に、近未来的に克服が難しいのなら、何を目標において我々には対策を講じるべきなのであるだろうか。

わが国は 2004 年 7 月に防災戦略の地域目標を各自治体で想定するよう閣議決定した。翌年の防災白書¹⁾には、それを承け成果重視の行政運営の考え方をより明確かつ積極的に防災分野に取り入れるべく、「今後 10 年以内に、地震による死者数及び経済被害額を半減する事を減災目標におき、対策を具体的に設定する。」よう関係地方公共団体に対し要請している。しかしここで一つの疑問が発生する。内閣府が示した「死者数半減」や「経済被害額半減」は目標の設定の仕方として正しいのであろうか。原則論から言えば目標なのだから半減などと言わず、被害ゼロ（災害をなくすこと、すなわち絶対的「防災」を意味する）を究極の目標値に設定すべきという意見が至極尤ものように思われる。しかし、人が社会生活を営むところに災害は進化し必ず潜む。人の活動自体が災害を生む構造となっているので、人がいる限り災害をなくすことは原理的に不可能である。被害ゼロ社会は理想ではあるが、現実的に不可能なことは目標値にはなり得ない。では、内閣府が示したような被害半減（災害を減らすこと、すなわち「減災」と

^{*1} 本稿は、2017 年 2 月 28 日開催の自然災害研究協議会北海道地区部会総会において行った特別講演を要約した同センター報告 Vol.31(2018)「災害リスクの構造」に工学的制御に関する内容を追加したものである。

か「縮災」*1 は目標値として正しいのであろうか。

図1は2017年1月16日付け朝日新聞掲載²⁾の都道府県別住宅耐震化進捗状況である。内閣府の要請を受け、2006～2007年度に47都道府県が「2015年度を期限とし死者半減のために、住宅耐震化率を90%に引き上げる」目標を掲げた結果である。これによれば目標達成の都道府県は皆無である。目標値の設定が厳しすぎたためであろうか。そうではない。国土交通省³⁾は2006年に改正耐震改修促進法を制定し、住宅及び特定建築物の耐震化目標90%を打ち出し、住宅改修のための個人財政支援を続けている。当初計画では、これにより耐震改修率が2～3倍増加し、自然建替と合わせて10年で90%耐震化は実現可能と踏んでいた。では何が問題であったのであろうか。理由の一つは、その後の我が国の経済状況の悪化による建築需要の停滞が上げられている。しかし筆者は目標値設定の考え方自体により深い問題が隠されているように思っている。そもそも災害対策の目標はどのように考えるべきなのであろうか。私見としての解は本稿最終章(8章)で述べるが、そのための助走として災害リスクとその制御(対策)について次章から7章までを使って整理しておこう。

2. リスクの定義

災害対策とは災害リスクを制御することである。我々はリスクという言葉が普段の生活の中でよく使うが、日常語化しているため、専門用語としてのリスク(Risk)すら混同して用いている専門家も多い。まずは、用語を整理しておく。日常語としてのリスクは辞書をひもとくと以下のように説明されている。

リスク【risk】危険。ある行動に伴って(あるいは行動しないことによって)、危険にあう可能性や損をする可能性を意味する概念。

日常語としてのリスクは、①危険の可能性、②危険の原因、③危険の大きさの3つの意味で使われることが多いが、手元の辞書では可能性についてのみ説明されており、曖昧さが払拭されない。専門用語としてのリスクは明確に定義されている。日本リスク研究学会の定義では、リスク(Risk)とは、単位時間あたりの予兆された被害量を言い、次式(1)で記載される。

$$Risk = Probability \times DamageImpact \quad (1)$$

この定義を基に筆者が以下に展開する。リスクは予兆であり、すなわちまだ発生していない事態を議論するので、発生確率(Probability: 単位時間あたりの事象発生数)がリスクの大きさを決める一つの

各都道府県が掲げた耐震化率目標と推計値

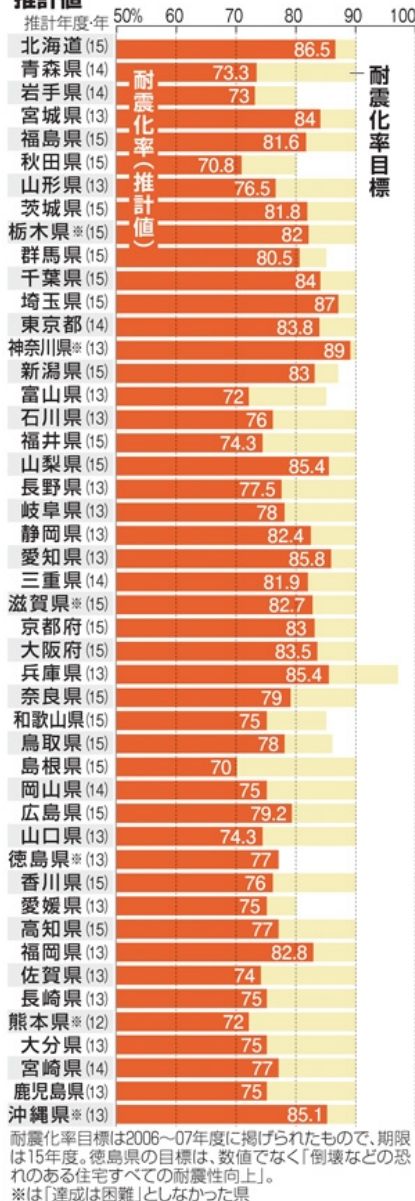


図1 都道府県別住宅耐震化進捗状況 (2017年1月16日朝日新聞より)

*1 「縮災」という語は、近年、河田恵昭関西大学教授が使い始めたキーワードであり、被害を押さえることで早期回復させようという「復旧」に力点を置いた考え方であるが、元より対策は時間軸で見ると「事前(防災)」～「事後(復旧・復興)」までを包括する概念であるので(4章(1)項「時間軸から見た対策」にて後述する)、特別に新しい考え方というわけではない。

要因となる。その結果として発生したものを被害 (*Damage*) や災害 (*Disaster*) と言い、その大きさを *Damage Impact* (被害衝撃力: 1 事象あたりの被害量) で定義する。被害あるいは災害を因果関係で表現すると、それを引き起こす直接的要因としての災害誘因 (*Hazard*: 災害入力とも言い、たとえば台風や津波の自然現象の大きさであり、地震動被害の場合は震度や最大地震加速度に代表される地面の揺れの大きさを表現する) と災害の受け手が持つ脆弱性要因としての災害素因 (*Vulnerability*: たとえば構造物の地震動に対する脆弱性や都市の火災に対する燃えやすさなどに代表されるが、目に見えない情報ネットワークや組織、システム、人間など社会に存在する全てが災害の対象となる) で決定する。地域を単位で考える場合は、その地域内に存在する被災対象の地域内分布 (*Population*: 数と分布状態を意味し、 $\Sigma Population$ と記述する) も問題となる。以上を数式記載すると、式 (2) のようになる。

$$DamageImpact = Hazard \times \sum_{Population} Vulnerability \quad (2)$$

一般に災害誘因 (*Hazard*) は自然現象であり制御できない。よって工学は制御可能な素因 (*Vulnerability*) を研究対象とする。なお、自然現象としての *Hazard* は制御と言うよりも、現象の理解という観点から理学が扱う現象である。

さて、リスクは混同しやすい用語であると既述した。日本で特に誤用が多い。それは日本が世界的に見るとホモジニアス社会^{*1} という特異な環境に由来する。地震災害についても、日本は木造家屋社会であるので、地震脆弱性 (*Vulnerability*) は日本各地ほぼ同一とみなされ、上式 (2) において *Vulnerability* は一定定数として扱われるため無視され災害誘因 (*Hazard*: ここでは地震動の強さ) が被害を決定づけるという図式がまかり通ってきた。すなわち「*Damage* (災害)」=「*Hazard* (自然現象)」=「天災」として受け止め、制御を諦めたリスク (許容せざるを得ないリスク) あるいは許容できるリスク (*Acceptable Risk*) として容受してきた歴史がある。災害誘因 (*Hazard*) を被害 (*Damage*) と混同する例は枚挙にいとまがない。たとえば地震発生の際に気象庁から発表される震度は *Hazard* の尺度であり、「震度 5 強の揺れ」という使い方をするものであるが、時々「震度 5 強の被害」というような被害尺度として使われるのは、その混同の最たるものであろう。

混同を許さない定義が如何に重要かは、以下の三段論法で理解できるであろう。

- ① 明確な定義ができれば、定量化が可能となる。
- ② 定量化ができれば、モデル化が可能となる。
- ③ モデル化ができれば、制御が可能となる。

以上が、工学的手法の神髄であり、全ては定義から始まる。

3. 工学的リスク制御の方法

以上定義されたリスクを如何に制御していくかを考えるのが災害対策である。工学的制御方法を中心に以下に整理する。災害低減のための対策の基本は多重対策であることを筆者は主張する。一つの対策が仮に破られても、多重で防御することで災害は回避できる可能性が高くなるからである。筆者は時間-因果-主導レベルの 3 軸の多重対策を提案する。図 2 に示す。以下、地震動災害を中心に議論する。

(1) 時間軸から見た対策

災害対策を時間軸で見た場合、その一般型は災害事象の発生前後で「事前対策」と「事後対応」に分類される (図 2 の時間軸参照)。同図は時計回りで時間が流れている。事前対策の対象はまだ発生してい

^{*1} 日本は木造家屋の占める割合の高いことに象徴されるようにハード的に一様であり、かつては社会構造的にも多くの日本人が中間層としての意識が高く、日本総中流階級という均一性が特徴であった。しかしその後大きな変化が訪れる。これについては、6 章 (8) 項「リスクの時代格差」において補足する。

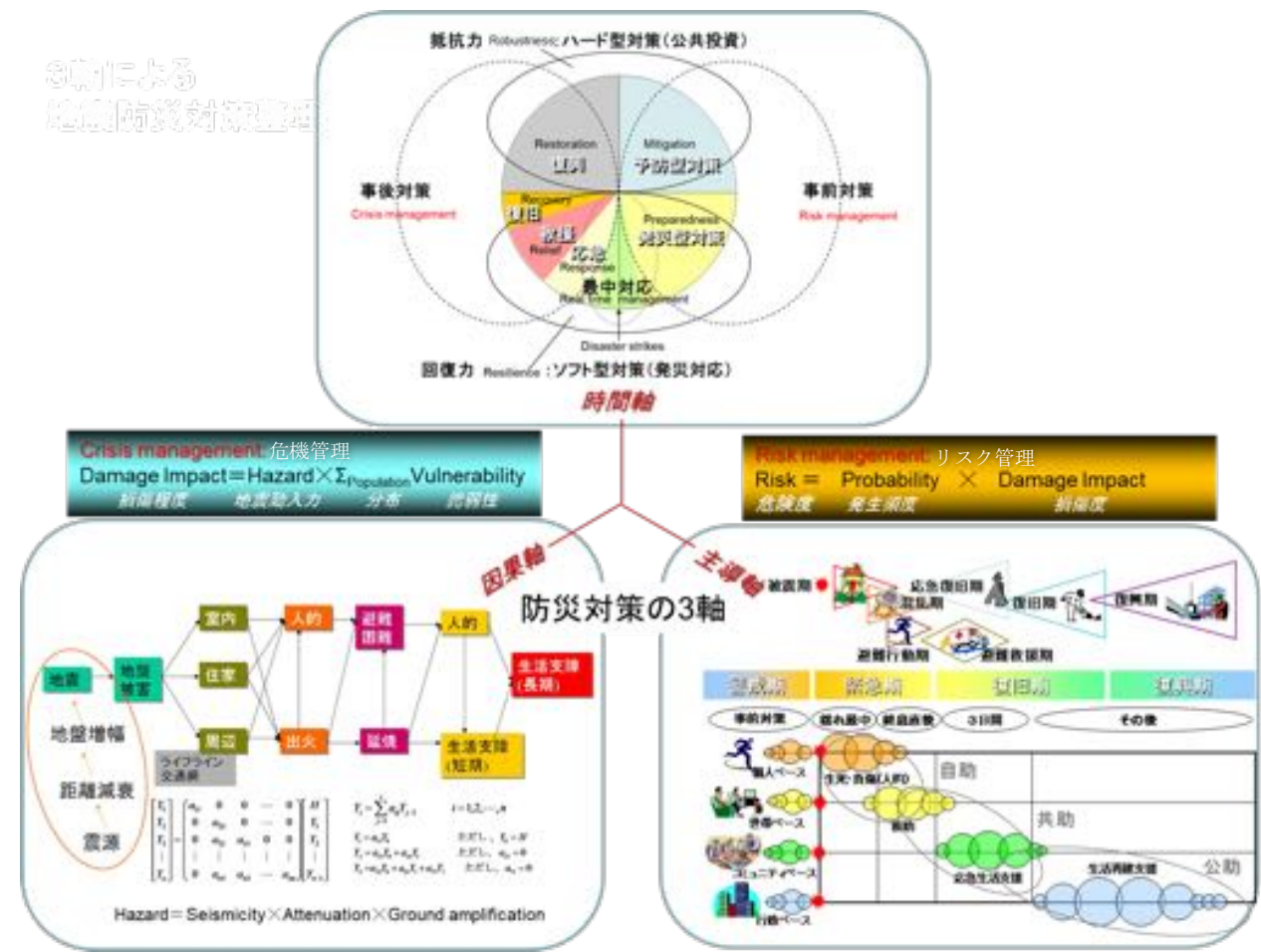


図2 3軸による地震防災対策整理

ない災害であり予兆としてのリスクである。その対策をリスク管理（*Risk Management*）と言う。災害を地震に限定した場合、事前対策とは当該地域への想定地震に対する準備型のものであり、災害の発生そのものを都市機能整備や耐震化等によりハード的に押さえ込む予防型対策（*Mitigation*）と災害の発生をある程度許容しつつ被害を拡大させない減災型対策あるいは発災対応型対策（*Preparedness*）に分類される。

事後対応とは前記した発災対応型対策を実践するものであり、その対策を危機管理（*Crisis Management*）と言い、消火活動や医療対応等の応急対応（*Response*）と避難所物資供給等の救援（*Relief*）、さらに復旧（元の状態に戻すこと：*Recovery*）あるいは復興（よりよい状態に改善すること：*Restoration*）を目的とした対応を言う。リスク管理と危機管理は同意的に混同使用される場面によく遭遇するが、本来、時間軸で見ると全く異なるものであることに注意が必要である。

事前対策と事後対応の二つの時間帯の狭間にある「揺れている最中」に関しては、かつては「揺れている最中の行動規範作り」が事前に行える最中対策の唯一のものであった。しかし、2007年10

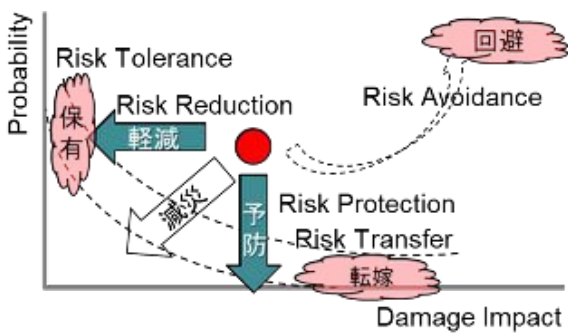


図3 リスク管理の概念図

月 1 日より気象庁が緊急地震速報の一般配信を開始したことにより、新たなアクティブな対策が現実味を帯びてきた。すなわち「最中防災（リアルタイム防災：Real-time Management）」が対策として市民権を得た。地震発生を確認した後に揺れが襲ってくるまでの遠地における余裕時間を利用するものと言う場合や正に揺れている中での対策を意味するなど、リアルタイムが持つ意味には多少の幅はあるが、前者の意味での最中防災で実用化されているものは、高速軌道（JR 新幹線）向けに開発された UrEDAS（ユレダス）と呼ばれている早期地震検知警報システムがある。気象庁の緊急地震速報も導入の大きな目的は同じであり、地震発生直後の初期微動を震源近傍で捉え、遠地に対して主要動が到達する前に、揺れの大きさと到達時間を予測し警報するシステムである。当研究室⁴⁾でも、室内における負傷回避にこのシステムを利用した避難誘導システムを開発している。

図 2 の時間軸には事前と事後という時間分類の他に、ハードとソフトという対策の質的分類がなされている。ハード型対策は現状をより耐震的な抵抗力（Robustness）を高める公共的対策を言い、時間軸上では復興～予防型対策が相当する。またソフト型対策は元の状態への回復力（Resilience）を高める対策を言い、時間軸上では発災型対策～復旧までが相当する。

事前対策（Risk Management）は予兆としてのリスクを下げる対策であり、式（1）によればリスクは発生確率（Probability）と被害衝撃力（Damage Impact）の 2 軸で表現できる。図 3 はリスクと事前対策との関係、すなわちリスク管理の概念図である。発生確率が高く、被害衝撃力も大きな HPHC（High Probability - High Consequences）型災害についてはその場所から回避（Risk Avoidance）するしかない。リスクをゼロに近づける減災には 2 方向の方法があり、耐震化対策などによる災害発生確率を押さえるリスク予防（Risk Protection）と避難計画などに代表される発災対応による事前準備で損傷程度を下げるリスク軽減（Risk Reduction）の方法がある。損傷程度が十分に小さな災害に対しては、事後対応のみで対応可能と判断できれば事前復旧計画や災害準備金積み立てなどのリスク保有（Risk Tolerance）が有効となる。一番の難題は低頻度高被害の LPHC（Low Probability - High Consequences）型災害であり、この場合は保険による金銭補償、いわゆるリスク転嫁（Risk Transfer）も対策の選択肢として考えておく必要がある。

事後対応（Crisis Management）の対象は起こった後の災害対応なので、式（1）において発生確率（Probability=100%）= 1.0 を代入すると、式（2）の被害衝撃力（Damage Impact）が事後対応の対象となることが分かる。式（2）が示唆するとおり、被害衝撃力は誘因（Hazard）と素因（Vulnerability）の積集合として表現されているので、その対策は因果律で概観するのがわかりやすい。

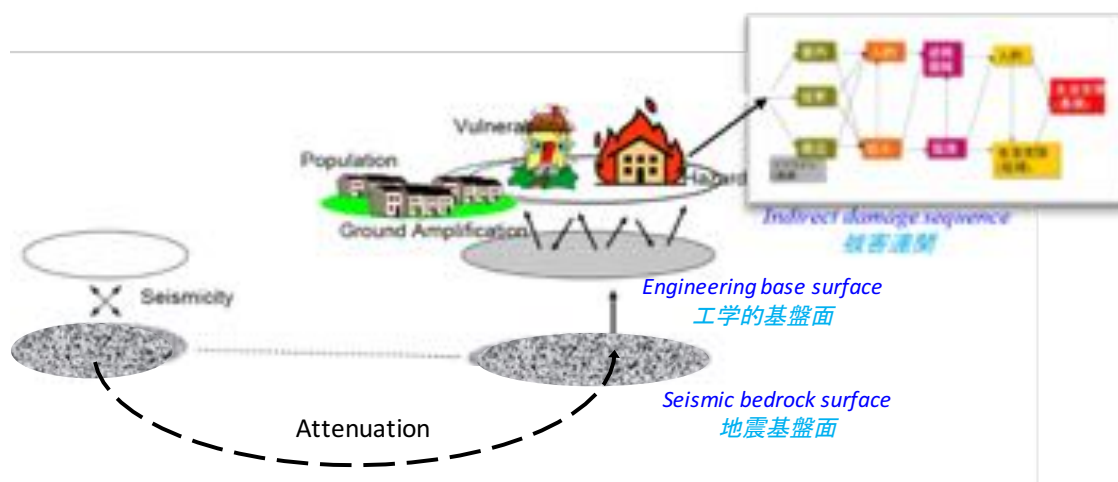


図 4 地震災害の因果軸

(2) 因果軸から見た対策

図 4 は図 2 左下（因果軸）を詳細化したものであり地震災害を因果の連鎖モデルで記載してある。式 (2) はさらに分解でき、誘因の *Hazard* は地震動災害においては地面の揺れ（地震動）に相当し、以下で表現できる。

$$\text{地震動 (Hazard)} = \text{地震活動度 (Seismicity)} \times \text{距離減衰 (Attenuation)} \times \text{地盤増幅 (Ground Amplification)} \quad (3)$$

素因については間接被害までを含めると、以下で数式表現できる (太田, 1982)⁵⁾。

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{n-1} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} Y_i &= \sum_{j=1}^i a_{ij} Y_{j-1} & i=1, 2, \dots, n \\ Y_1 &= a_{11} Y_0 & \text{ただし、} Y_0 = H \\ Y_2 &= a_{21} Y_0 + a_{22} Y_1 & \text{ただし、} a_{21} = 0 \\ Y_3 &= a_{31} Y_0 + a_{32} Y_1 + a_{33} Y_2 & \text{ただし、} a_{31} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、*H* は *Hazard*、 a_{ij} は素因特性 (*Vulnerability*)、 Y_i は被害 (*Damage Impact*) である。低次の被害が高次の被害を誘導する下三角行列モデルとなっている。因果軸から見た対策は、式 (2) ~ (4) における各要素を小さくすることであり、また各要素間のつながりを断ち切ることである。各要素で工学的に制御可能なものは式 (3) 中の *Ground Amplification* と式 (2) 及び (4) 中の *Vulnerability* 並びに式 (2) 中の *Population* である。*Ground Amplification* の制御は基礎や地盤改良等の対策に相当し建築・土木工学が担当している。*Vulnerability* の制御の代表例は構造物の震動対策であり、建築工学では耐震・免震・制振技術がある。*Population* は地域分布を制御する対策であり、土地区画整理事業や地域地区指定等の法制度による人口移動誘導を主とする都市計画対策がある。一方、制御不能な式 (3) 中の要素 *Seismicity* や *Attenuation* は地域襲来の強震動の事前評価や緊急地震速報に寄与する直前予測などにより情報提供という形で防災的応用がなされている。以上の因果律から見た地震災害要素の制御方法を表 1 にまとめる。因果軸で災害を理解することにより、合理的な対策技術の発見につながる。

(3) 対策主導軸から見た対策

図 2 右下（主導軸）は対策の主導レベルと時間軸（災害の局面）との関係を図示したものである。揺れている最中は自分や家族の生命を守る対策であり、個人で対応せざるを得ない部分である。揺れが止まった直後は家族全員の安全を確保する行動が求められる。室内散乱や住家倒壊などで閉じ込められた

表 1 因果律から見た地震災害要素の制御方法

値段	$DamageImpact = Hazard \times \sum_{Population} Vulnerability$ $Hazard = Seismicity \times Attenuation \times GroundAmplitude$		
活用方法	災害要素	担当分野	具体策例
制御可能	Ground Amplification	建築 地盤工学 土木工学	基礎 液状化対策 地盤改良
制御可能	Vulnerability	建築構造	耐震 免震 制振
制御可能	Population	都市計画	土地区画整理事業、地域地区指定、地域誘導、遷都
制御不能	Seismicity	地震学	地震想定
事前評価	Hazard	地震 (工学)	Hazard Map (強震動予測) Risk Map (被害評価)
事前予測	Attenuation	地震学 地震工学	緊急地震速報 避難誘導システム

場合、家族の協力の下で脱出避難が必要となろう。これら自分自身及び個人世帯での対策行動を一般に自助と呼ぶ。災害が大きい場合、行政の地域支援が十分には届かない。この場合は、地域住民の助け合いが重要となる。行政の地域支援が安定するのに阪神淡路大震災の時には3日間、東日本大震災の時には約1週間を要したという。この間の地域活動を一般に共助と呼ぶ。公助と呼ばれる行政支援が最も必要とされるのは地域復旧復興の時点である。このように対策には対策を主導するレベルごとに役割分担があり、地域の防災力はこれら自助×共助×公助の積集合として評価される。すなわち、一つでも十分に機能しなければ、対策は零になってしまうことを意識しなければならない。

災害対策は3軸間での多重性に加え、各軸内での多重性にも配慮するのが基本である。以下、各軸内での多重性についてまとめておく。

1. 時間軸での多重性

「事前対策（予防型+発災対応型）～リアルタイム対応～事後対応」

2. 因果軸での多重性

「地震学（震源モデル）～地震工学（強震動評価）～地盤工学（地盤対策）～建築工学（構造物対策）～都市計画（地域分布）～社会学（間接災害）～…」

3. 主導軸での多重性

「自助×共助×公助」

4. 自然災害の本質

リスクの制御方法（対策）について整理されたので、次ぎにその目標とすべきところを議論する。対策目標は災害の本質を理解し、そこに踏み込むところから始まる。災害の本質についてここで少し論じてみたい。対策の主眼に置くべきことを理解するためである。少し古い記述となるが、気象学者高橋浩一郎⁶⁾の著作から災害の本質を列挙してみると以下ようになる。災害のもつ特性とは、

- 1) 異常性と意外性
- 2) 偶然性と集中性
- 3) 局地性と多発性
- 4) 歴史性と免疫性

で記述される。まずこれらについて概略説明し、本章最後で本稿のテーマでもある災害の不平等性が災害の本質であり、これを理解し克服することの意義について触れていく。

(1) 異常性と意外性

高橋は異常性と意外性を同一の意味で用いており、「災害は原則的にまれに起こる現象であるといえる。そして、被害の少ない災害は頻度が多いが、まれではあるが異常に被害の大きな災害が起こり、それが長い目で見ると、全被害の中で大きな割合を占める。」と著作の中で総括している。図5は高橋のデータに基づき、筆者が図化したものである。横軸は一つの地震で発生した死者数を示し、それだけの死者を伴う地震の発生頻度を棒グラフで、そのクラスの死者数合計を折れ線グラフで示してある。

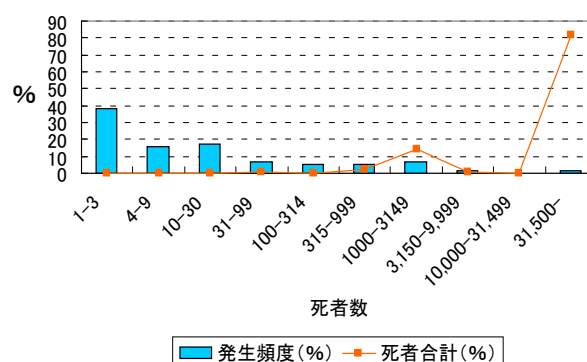
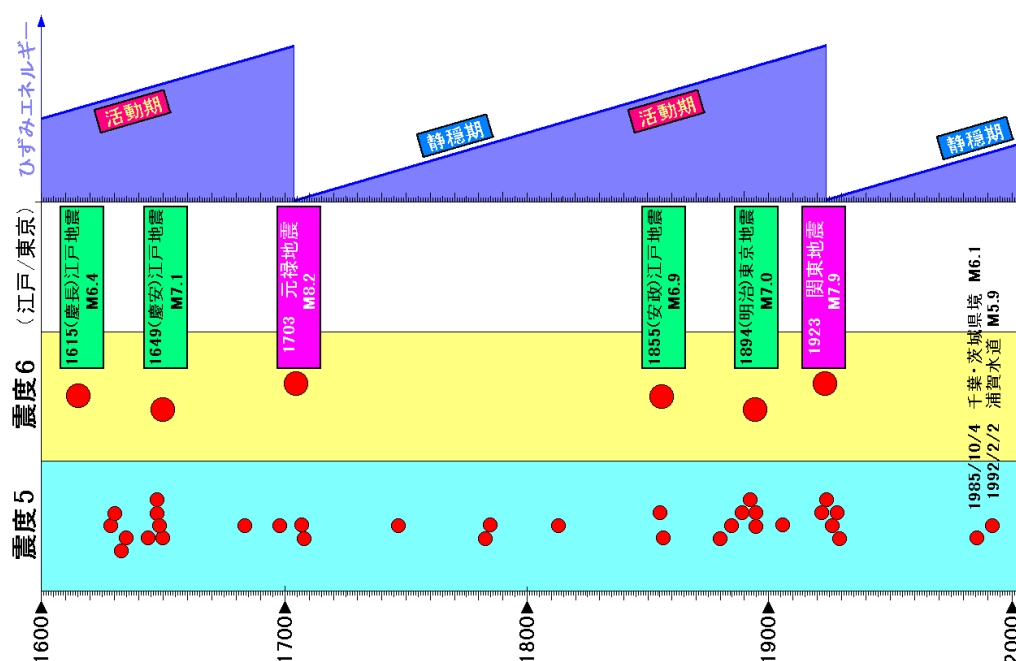


図5 死者数による震災規模（日本） [高橋浩一郎（1977）に基づき作成]

図6 東京で観測した震度時系列 [岡田義光 (2001)⁷⁾]

グラフから、死者数が多くなる地震ほど発生頻度は減っていく傾向が読み取れる一方で、死者数合計は31,500人以上の死者が発生した一つの地震（1923年関東大震災）で死者合計の80%以上に達していることが示されている。災害の異常性と意外性を端的に示すグラフであり、滅多に起こらないが起ると大惨事を引き起こすのが災害の本質であると高橋は言っている。最近の言葉で言うならば、低頻度高被害（LPHC: Low Probability – High Consequences）型災害が対策の最重要ターゲットと言うことである。

(2) 偶然性と集中性

高橋は偶然性と集中性を災害の本質の2番目に取り上げている。「災害は偶然的にまれに発生する現象であるが、異常な災害は時期的に集中して起こることも経験的に知っている。」と著作の中で述べている。偶然性については、まれに起こる現象であることに、より留意すべきである意味を込めて、寺田寅彦の言より「災害は忘れた頃にやってくる」を高橋は引用しているが、集中性については「災害は忘れないうちにやってくる」ことも同時に指摘した災害の特質とも言えようか。偶然性と集中性の地質学的説明は、図6の地震の歪みエネルギー解放の静穏期と活動期により理解できる。同図は東京で観測された震度6と5の地震の発生時系列である。

地震エネルギーは多発する小さな地震では十分に解放されず、低頻度ではあるが関東に震度6相当の揺れをもたらす大きな地震発生により解放され、その後しばらくは地震エネルギーの蓄積が進み（地震静穏期）、ある程度の歪みが溜まった頃に再び大きな地震が発生し始め（地震活動期）、この静穏期と活動期が交互に繰り返すことになる。静穏期は事象発生「偶然性」に相当し、活動期は事象発生「集中性」と特徴付けられる。歪みエネルギーの蓄積と解放が一定のリズムを持つ原因は、日本列島下にプレートが一定速度（たとえば、太平洋プレートは約10cm/年）で潜り込む現象に依っている。

偶然性と集中性は地震発生現象として重要な性質であり、確率統計学的にはポアソン分布で表されることが多い。発生確率が p となるある現象を考える。 n 回中 x 回について発生する事象は2値（「有る」か「無い」か）のみをとるランダム現象の時、その密度関数（PMF: Probability Mass Function）は以

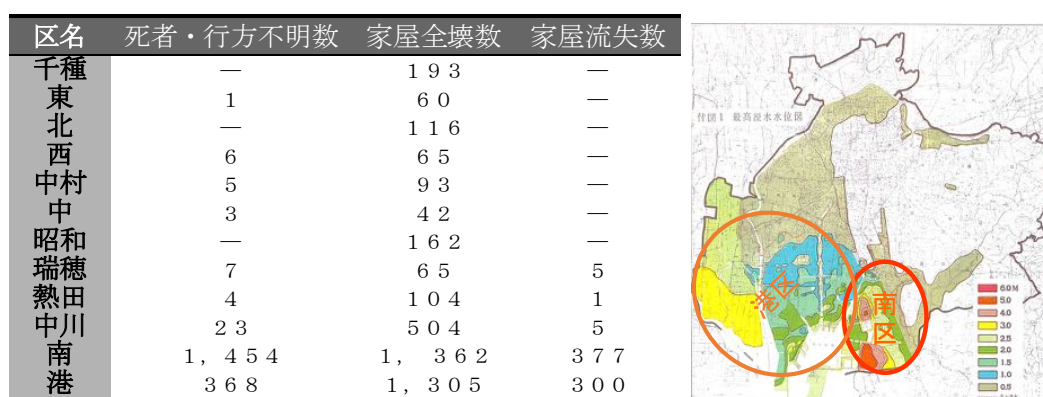


図7 伊勢湾台風による名古屋市の被害状況一覧と最高浸水水位図（名古屋市：伊勢湾台風災害史（復刻）より）

下で表され、二項分布と呼ばれる。

$$PMF \equiv P(X = x) = {}_n C_x \cdot p^x \cdot (1 - p)^{n-x} \quad (5)$$

この二項分布において、 $\lambda = pn$ とおき、 $n \rightarrow$ 大、 $p \rightarrow$ 小としたとき（すなわち、回数 n を大きくし、発生確率 p を小さくしたときであり、まれに発生するランダム現象を考えることに相当する）、二項分布は以下のポアソン分布となる。

$$PMF \equiv P(X_t = x) = (\lambda^x / x!) e^{-\lambda} \quad (6)$$

ここに確率変数 X_t は時間間隔を意味する。高橋も著書において、ポアソン分布を用いたコンピュータシミュレーションを行い、事象発生の偶然性と集中性を解説している。この確率分布は地震の発生現象に良く用いられるが、地震現象は発生間隔についてランダムではなく図6に示したように一定の再帰時間（繰り返し時間）があるので、正確な意味でのポアソン分布ではない。最近では BPT (Brownian Passage Time) 分布^{*1} が用いられる。

(3) 局地性と多発性

前項は時間的集中性を災害の特質と解釈したものであるが、空間的集中性を高橋は局地性と多発性（災害は局地に多発する）というキーワードで説明している。空間的に被害が集中し、災害が多発する地域が必ずある。前項(1)と(2)が災害誘因（災害を直接引き起こす入力に関する要因のこと）に関する特性であったが、本項の局地性と多発性は災害素因（災害を受ける被災対象が持つ災害拡大要因のこと）に関するものであり、災害脆弱地域として合理的説明が比較的容易に可能である。高橋は例として津波を挙げ、地域特有のリアス式海岸が津波高を嵩上げする理由と述べている。また、災害対策基本法成立の動因となった1959年伊勢湾台風による名古屋市内の被害状況を表として掲げている（図7）。港区と南区の名古屋市沿岸で死者数が異常に多く発生している。いわゆる海拔ゼロメートル地域であり、最高水位が高くなる地域である。また沿岸地域は台風による強風域に一致し建物が倒壊しやすくなる一方、内陸域では地面抵抗により風速は弱められ家屋被害が少なくなった。災害は脆弱地域を狙い撃ちする。

(4) 歴史性と免疫性

災害素因のもう一つの特性がこの歴史性と免疫性である。災害の受け手（人々が集住する集団（まち）

^{*1} 統計学の分野では「逆ガウス分布」と呼ばれている。

を意味する) が時代と共に変化し耐災害性能を獲得して災害免疫性を保有する(災害を認識し効果的対策が完了した地域を言う) 反面、まだ災害として認識されず対策が講じられていない災害に対しては殆ど無防備状態で災害を繰り返している(高橋はこのことを災害の歴史性と呼称した)。高橋は著作の中で、荒川英俊の災害の歴史(1964)を引用し、その年代別災害数について言及している(図8)。

表は歴史と共に増加している災害(風水害、噴火災害)、減少している災害(干魃、疾病)、増減変化の激しい災害(霖雨、飢饉、火災)、よく分からない災害(地震災害)があることを示しており、それぞれの災害発生数を時間変化から説明している。人間集団の住み方(まちの発展の様相)が時代と共に大きく変化し、それに呼応し災害も時代と共に進化する。その受け手側の特質から河田恵昭は都市の集中のパターンにより災害を都市化災害・都市型災害・都市災害の3種に類型化している(図9)。3種とも似たような意味を持つキーワードであるが、集住都市に発生する被害として、被災地住民及び国土全体に与える影響の大きさの違いを、都市化しつつある発展途上の集住地域が被災する災害を都市化災害と定義し、都市として成熟した集住地域が被災する災害を都市型災害と定義し、人口1000万人を超えるメガシティが被災する災害を都市災害と定義し、その災害の脅威を段階化している。

我々は技術革新が進むことによる都市集積の魅力とその脆弱化に、より敏感になるべきであろう。図10は集積することによる魅力と脆弱性についてまとめたものである。このあと筆者は格差問題を扱うが、集積による経済成長の魅力が国土の一極集中化を助長し、我が国における暮らしやすさに関する地域格差を広げる一因となるが、同時に地理学的にかつ都市計画学的に、さらに経済学的にも極めて災害に脆い構造を作り出していると言わざるを得ない。後述する村上春樹⁹⁾が懸念している1995年問題がこのことにも起因しているのであろう。

(5) 不平等性

以上の4つの災害の本質のうち、筆者は第2と第3の集中性に着目したい。高橋は「時間的集中性」と「空間的集中性としての局地性」を指摘しているが、集中性はなにも時間と空間のみではない。災害は弱者ばかりに集中する。このことを称して、「災害の不平等性」と筆者は呼んでいる。対策の視点として、



図8 年代別災害数(日本) [高橋浩一郎(1977)に基づき作成]

都市パターン	人口密度	都市基盤整備	被災種類	被災過程
都市化災害	経年的に増加中	整備途上	古典的	単一
都市型災害	国平均の数倍～10倍程度	一応整備完了	物的被害に集中	既知
都市災害	国平均の20倍程度	不均衡	人的・物的・巨大被害	未知

図9 都市の集中と災害の進化(河田恵昭氏の定義)

災害の不平等性を解消すべくリスクの平等化があるのではないかと思うからである。そして、災害の本

集積都市の魅力と脆弱性		Megacity 人口1000万人以上の都市 (2009)				
変化 成長 期待大	集積の魅力	Rank	Megacity	Country	Population	Annual Growth
	1. 効率化・利便性向上	1	Tokyo	Japan	33,800,000	0.60%
	2. 選択肢の多様性拡大 ・都市型産業(業種の新たな組み合わせによるサービス誕生の可能性)発展 ・工場型産業(ルーチン産業が主体)衰退	2	Seoul	South Korea	23,900,000	1.40%
	3. プライバシーの確保	3	Mexico City	Mexico	22,900,000	2.00%
	4. 市場性拡大	4	Delhi	India	22,400,000	4.60%
	5. 高賃金・高所得期待	5	Mumbai (Bombay)	India	22,300,000	2.90%
命の 危険性大	6. 新しいライフスタイルの提案可能性大	6	New York City	USA	21,900,000	0.30%
	集積による脅威	7	São Paulo	Brazil	21,000,000	1.40%
	1. 巨大都市の出現	8	Manila	Philippines	19,200,000	2.50%
	2. 野放図な都市計画 ・都市の二重構造化増長 ・未知なる被害(長周期、ネットワーク被害、帰宅困難者)の可能性大	9	Los Angeles	USA	18,000,000	1.10%
	3. 被害の長期化懸念(物資不足、情報錯綜)	10	Shanghai	China	17,900,000	2.20%
	4. 地域の災害未体験者増加(経験の風化、災害文化継承されず)	11	Osaka	Japan	16,700,000	0.15%
		12	Kolkata	India	16,000,000	2.00%
		13	Karachi	Pakistan	15,700,000	4.90%
		14	Guangzhou	China	15,300,000	4.00%
		15	Jakarta	Indonesia	15,100,000	2.00%
		16	Cairo	Egypt	14,800,000	2.60%
		17	Buenos Aires	Argentina	14,100,000	1.00%
		18	Moscow	Russia	13,500,000	0.20%
		19	Beijing	China	13,200,000	2.70%
		20	Dhaka	Bangladesh	13,100,000	4.10%
		21	Istanbul	Turkey	12,500,000	2.80%
		21	Tehran	Iran	12,500,000	2.60%
		21	Rio de Janeiro	Brazil	12,500,000	1.00%
		24	London	United Kingdom	12,300,000	0.70%
		25	Lagos	Nigeria	11,400,000	3.20%

世界の人口と都市化の進展(国連予測)		
	世界の人口[億人]	都市人口[億人]
2000年	62.6	32.0 (51.2%)
2025年	85.1	55.0 (64.6%)

図 10 左) 集積都市の魅力と脆弱性 右) メガシティと都市化の進展

質はリスク格差に隠されていると思うからである。以下、私見を交え少しだけ、リスク格差について解説してみたい。

簡単な数値実験をしてみよう。災害でやられた人を犠牲者と呼ぶ。災害にやられやすい人を災害弱者と呼ぶ。そして非災害弱者を健常者と呼ぶ。災害発生時における健常者の被災率を仮に 0.5% ($P(\text{犠牲者}|\text{健常者}) = 0.005$) としよう。そして災害弱者の被災率は、健常者の被災率の 10 倍のリスク不平等性を課し 5% ($P(\text{犠牲者}|\text{弱者}) = 0.05$) としよう。また、ある地域における健常者と弱者の存在割合を $8:2$ ($P(\text{健常者}) = 0.8$, $P(\text{弱者}) = 0.2$) としたとき、顕在化した犠牲者の内、災害弱者はどの程度を占めるだろうか。これは条件付き確率で表現される問題なので、ベイズの定理(式(7))により解くことが出来る。

$$P(\text{弱者}|\text{犠牲者}) = P(\text{犠牲者}|\text{弱者}) \times P(\text{弱者})/P(\text{犠牲者}) \quad (7)$$

上式中、犠牲者の発生確率 $P(\text{犠牲者})$ は式(8)で与えられるので、

$$P(\text{犠牲者}) = P(\text{犠牲者}|\text{弱者}) \times P(\text{弱者}) + P(\text{犠牲者}|\text{健常者}) \times P(\text{健常者}) = 0.014 \quad (8)$$

$$\therefore P(\text{弱者}|\text{犠牲者}) = 0.71 \quad (9)$$

すなわち、顕在化した犠牲者中の約 70% は災害弱者ということになる。災害の発生確率がランダムであったなら、健常者と弱者の存在割合の比が発生確率になるはずである。すなわち弱者の被害発生率は 20% に留まるはずが、災害脆弱性という不平等性により発生現象は確率的バイアス発生となり、災害弱者に集中し 70% の被害発生率となって顕在化する。そしてその顕在化の前段として災害弱者はリスクの格差で生まれる。このリスク格差を解消する努力こそ、防災対策の目標とすべき視点なのではないだろうか。

5. リスクを決定づける環境

以上、災害の本質を分析し災害弱者にリスクが集中することを指摘した。3章で整理概観した工学的制御の方法を活用し災害対策を進めるための目標はどのように設定すべきなのであろうか。本稿の主題に戻ろう。

冒頭に示したリスク定義式(1)(2)から何が読み取れるであろうか。リスクを定義する理由は、そこに関わる要因とそれを左右する環境を理解し

リスクを正しく制御するためである。視点をグローバルに移動しよう。定義より明らかなのは、リスクはある地域またはある時代のもつ種々の環境のリスク耐性（リスクを制御する力）で決まると言うことである。それを地域あるいは時代のリスク耐性環境と名付けるならば図 11 のような図式が描けよう。

同図は被害の大きさ（Damage Impact）は誘因（Hazard）と素因（Vulnerability）で決まると同時に、環境の格差で決まるという構造を描いている。Hazard 環境は文字通り、Hazard の受け易さを言うものであり、Hazard を決定づける環境は、地震や台風などの自然現象としての災害誘因の発生確率が関与するリスク環境格差であり、この環境格差は人為的に制御ができない不随意要因である。日本は地震の発生源である 4 枚のプレート境界が接する場所に位置しており、地震襲来を避け得ない。

式(2)の災害素因（Vulnerability）に関わる耐性環境は風土と社会（あるいは生活）の環境である。風土とは一般に気候や地形などの自然環境を言うが、ここではその地域や時代の背景を作る住まい方や文化などの人為的環境を規定するもの、あるいは自然環境と人為環境を含めて風土と言う。

地震で地域の住まいが破壊され、その瓦礫の下敷きになり人は傷つく。瓦礫の下で生存できる時間長さのことを災害医療分野で「黄金時間（Golden Time）」と言っている。その時間内に助け出さなければ、生存可能性は殆ど無いという *critical limit* である。国や地域により異なり、中東では 12 時間（組積造の素材である粗石やアドベの瓦礫下における生存時間）、日本では 24～48 時間（木造の瓦礫下における生存時間）、メキシコでは数日間（RC 造の瓦礫下における生存時間）と言われている。凶器と化す建物瓦礫の材料やサイズ・粉塵量などはその地域の住宅形式に大きく依存する。このように災害発生時の凶器（専門用語で成傷器と言う）は地域を形成する住文化により決まる要素が大きい。風土環境は基本的に人為制御が可能であるが、長い年月をかけて培ってきた住文化に関わるので、一朝一夕に変えられるものでもない。よって、半不随意要因と位置づけられる。風土の東西問題（地理的位置が決定する気候帯の違い）に関わるリスク環境格差である。

Vulnerability に関与するもう一つの環境として社会（生活）環境がある。大きく言ってしまうと、その国の技術力・社会末端までの教育力であり、国民の情報リテラシー（文化度）を言う。社会を防災化する技術的・経済的余裕度そしてその重要性の社会的認識度を言う。社会生活環境は人為的に変化させることは可能であり随意要因であるが、根本に大きな慣性力をもつ生活の南北問題（国家間の貧富格差問題）が横たわっており、急激な変革は政治的・経済的・文化的に難しい面がある。なお、災害時に脆弱なモノ（Vulnerability）が地域内あるいは地域間でどのような分布性状（Population）を有しているかも、その地域における被害の大きさ（Damage Impact）には影響する。Vulnerability 同様に、風土環境や社会生活環境がその分布格差を左右する。

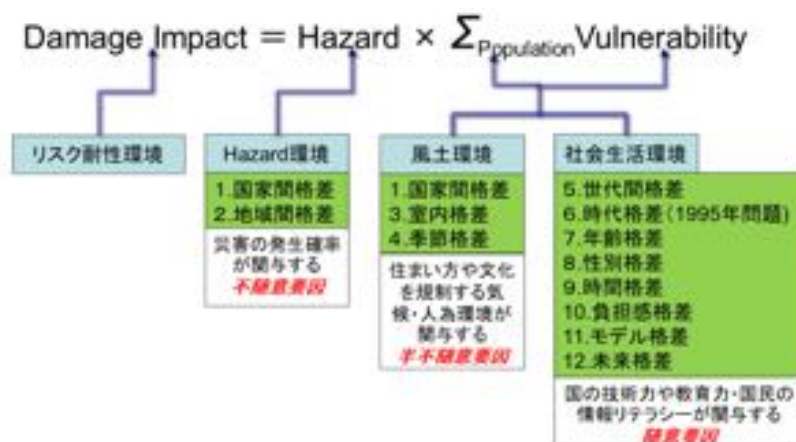


図 11 リスクを決める環境

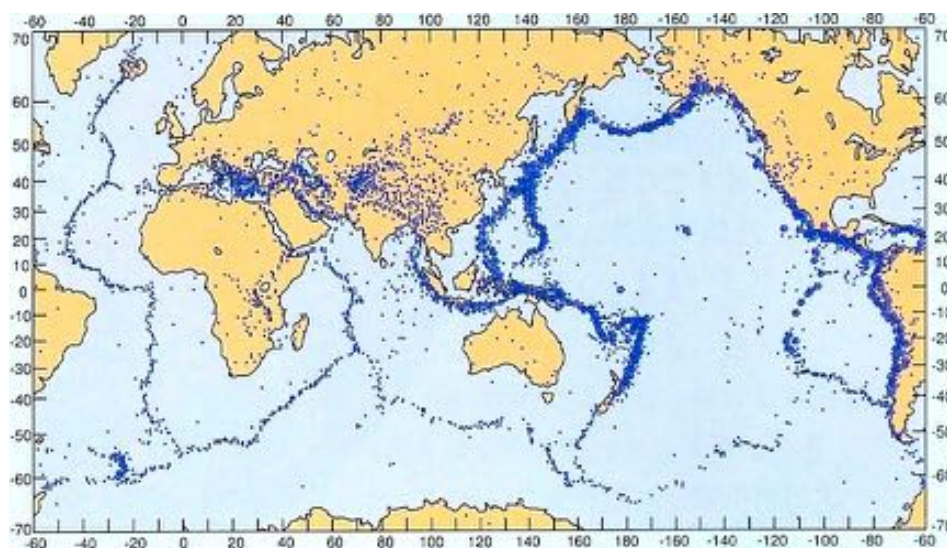
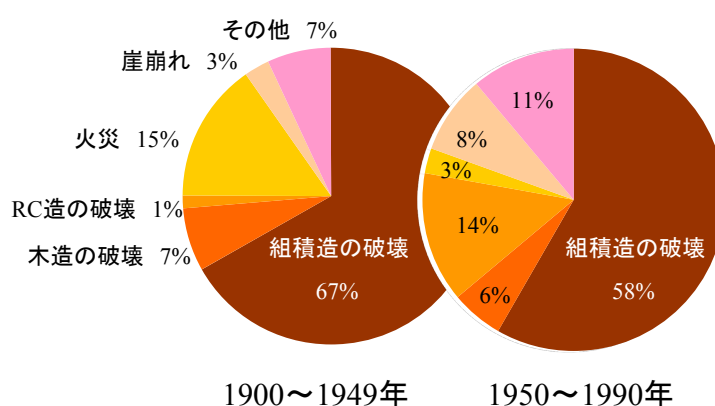


図 12 大地震の震央分布

以上よりリスクが定義され、それを決定づける環境が明確となった。避け得ない環境とそれに立ち向かう環境が拮抗し、その地域や時代のリスク耐性を決定づける。その結果として、リスクの格差が発生するが、その格差を減じる方向性を理解することが重要である。その一歩が、すなわちリスク認識であり、それがリスクに対する制御力向上に繋がる。リスクの格付けが固定化しないためにも重要である。4章において災害の本質として不平等性をあげた。リスク格差が災害弱者を生み、災害は弱者に集中する。我々はリスク格差により無意識的に誰もが災害弱者になり得る（すでになっている）ことに気がついてもらいたい。

6. リスクの格差

以上のように、リスクはその地域やその時代の環境が持つ特性で決まってくる。そうすると当然、地域差や時代差が生まれる。リスクは不平等性を特徴とするものであり、弱点を巧みに突いてくる。災害弱者は必ず存在するものである。まずはそのことを理解し、防災をもう一度考え直してもらいたい。まずはリスクにはどのような格差があるのか、地震災害を例に図 11 を具体的に解説する。

図 13 世界における地震災害による死因 [Coburn & Speice(1992)⁹⁾ に基づき作成

(1) 国家間格差

災害発生確率の大きな地域ほど災害リスクは大きいことを、式 (1) で見てきた。地震を例にするならば、地震発生確率の地域間の差は図 12 に端的に表されている。Hazard 環境の国家間格差と言うべきものであろう。地震プレート境界に位置する国が大地震襲来の危険性が高い国と言える。図 13 は地震災害による死亡者の原因割合を示したものである。年代にかかわらず、組積造の破壊による死者が多い。住宅材

料に荒石や煉瓦等を採用する国は亜熱帯砂漠気候に位置する中近東から中央アジアであり、断熱効果が高く安価で大量に入手可能な素材であり、それを使った構法（組積造構法）が住宅形式を決定づけている。組積造構法は鉛直荷重には耐えるが横方向荷重には脆く、その素材は重く、成傷器としての殺傷力は高い。一方、日本は北海道を除き温帯落葉樹林気候に属しており、木材を使った風通しの良いフレーム構造が主である。木材や屋根材としての瓦もある程度の重量を有しており成傷器としては組構造に似て危険な素材であることが図 13 より理解できる。タイ・インドネシア・フィリピン等の東南アジアも住家の主材料は木材である。日本とは違い、湿潤な亜熱帯気候に属するため軽量木材による開放性の高い構法が採用されている。地震に加え、津波にも弱い構法の多い地域である。このように住宅素材（成傷器）とその破壊の容易さ（構法）は風土の東西問題（気候帯）により決定する。住家構造の脆弱性及び住家瓦礫の殺傷危険性に関わっており、*Vulnerability* を決定づける風土環境に関する国家間格差と言うべきものであろう。

図 14 は自然災害による死亡率とその国の平均寿命の関係を示した興味深い図である。平均寿命の長い国ほど自然災害で死ぬ確率が低いことを示している。

国の平均寿命は国民の富と情報量に大きく影響されるとの指摘がある¹¹⁾。国の技術力とその技術力の浸透力（末端までの教育程度）が結局は自然災害に対する防御力を育てていることが分かる。筆者はこの社会生活環境の違いを生活の南北問題（国家間の貧富格差問題）と呼んでいる。

Vulnerability に関与する風土環境と社会生活環境の総合を見たのが図 15 である。同図は 20 世紀に発生した地震災害による国別の死者数と被害額の関係を示したものである。国毎に特徴的に固まっているのがよく分かる。経済的被害（被害額）は少ないのに死者が多いのは中近東～中国であり、米国及び南欧は死者数はそれほどでもないが被害額が大きい。東南アジアはその中間に位置している。日本は死者も経済被害も共に大きい最悪な地域となっている。この地域ブロック分けは、以上のハザード環境と風土環境及び社会生活環境の違いがもたらすものであり、国家間のリスク格差は大きいと言えよう。

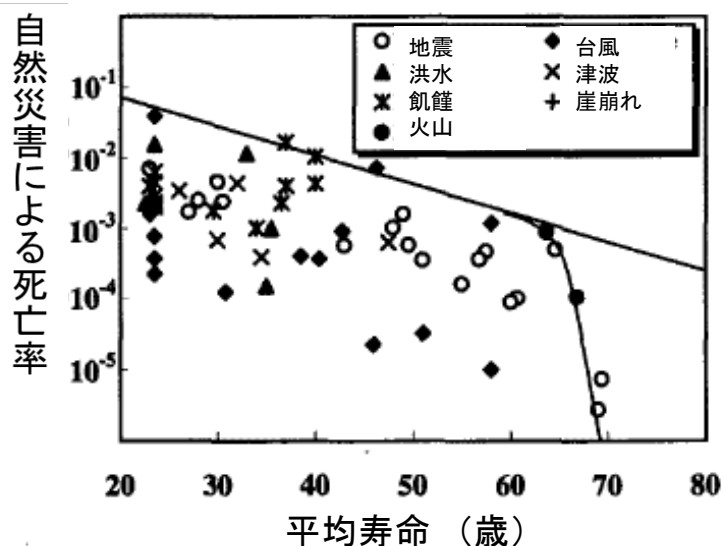


図 14 国別でみた自然災害による死亡率と平均寿命の関係 [河田・他 (1998)¹⁰⁾]

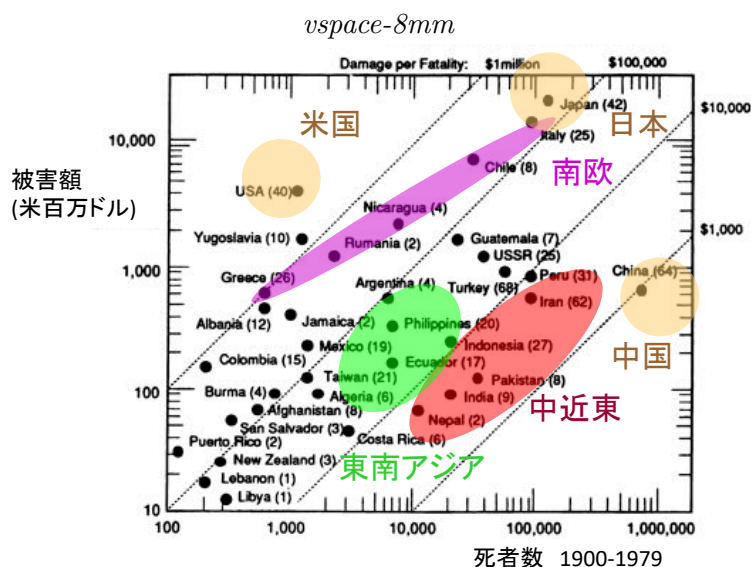


図 15 国別でみた地震による死者数と被災額の関係 [Ohta et al., 1986)¹²⁾ に加筆]

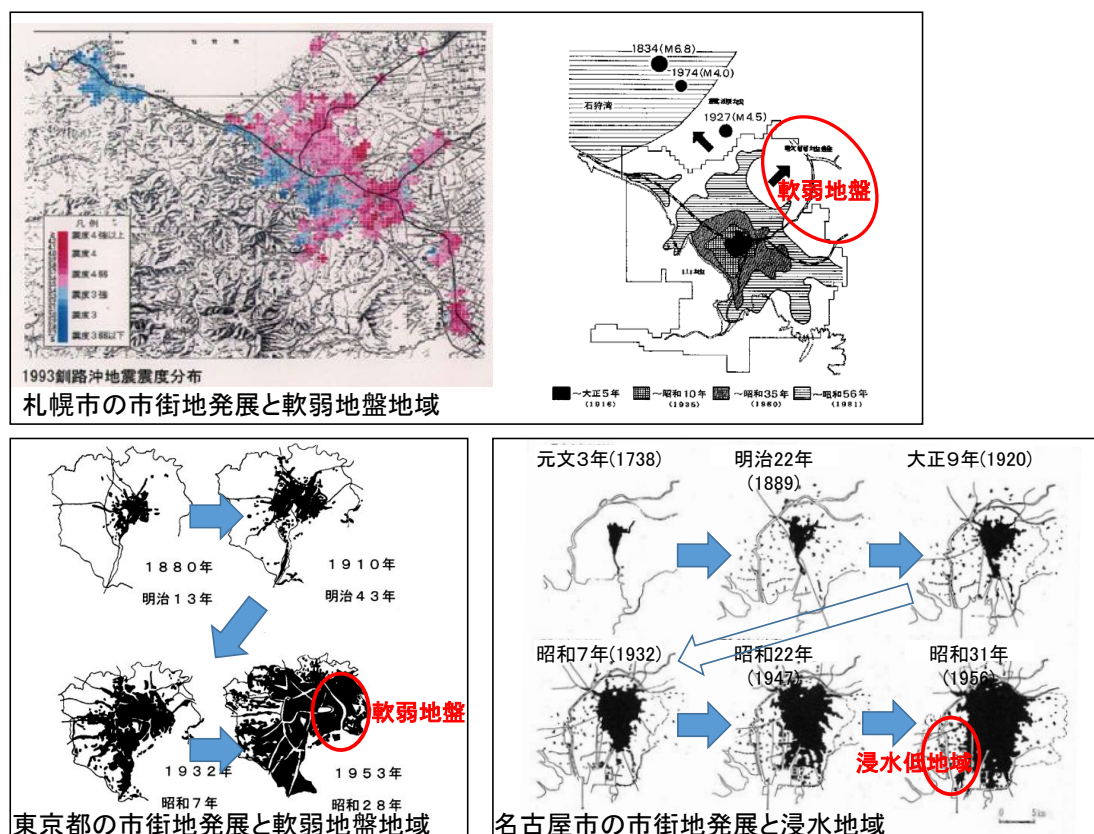


図 16 街区の発展軸と災害脆弱地域の関係

(2) 地域間格差

Hazard 環境に関しては国家間格差に加え、同一国内においても地域間格差とも言えるべきリスク格差が存在している。図 16 は 1993 年釧路沖地震の時の札幌市内の震度分布図である¹³⁾。明らかに JR 函館線を境に揺れやすい地域と揺れにくい地域が存在しており、他の地震でもこの現象は再現されている。軟弱地盤と安定地盤の地盤条件の違いがもたらす自然現象であり、前章の高橋の局地性（空間的集中性）に相当するが、実は都市の市街地形成プロセスがこの自然現象のリスク格差に地価を持ち込み、社会現象として地域間リスク格差を固定化している。この現象は東京や名古屋の大都市圏でも確認されており¹⁴⁾（図 16 参照）、街区の発展軸が *Hazard* 環境の良好地区から劣悪地区へと伸びていく、すなわち高級住宅街は *Hazard* 環境が良好であり、地価の安価な新興住宅街は *Hazard* 環境が劣悪な市街地形成を辿っているケースが多い。そしてその地域の災害の歴史（災害文化）に不案内な余所者（災害情報弱者）が新参者であるが故に、地価の安い *Hazard* 環境の劣悪な土地を選択しがちである。大都市圏はこのように、まちの発展軸による地質学的地域間格差の発生とその危険な地域に災害情報弱者が定住する危険性という二重に危険な社会構造を作り出していると言えよう。

(3) 世代間格差

指摘の殆ど無いことであるが、*Vulnerability* や *Population* に関わる社会生活環境には世代間格差のリスクも存在している。地震時の室内散乱に伴う負傷危険度は床面積あたりの家具の転倒面積比（家具転倒領域率）で計算される。当研究室が調査した道内の世代間比較を図 17 に示す。世帯主の年代比較であるが、年齢と共に世帯保有の家具数が増え負傷危険度が上昇し、30～40 歳代が危険度のピークを迎えて

いる。50 歳代以降も家具数は増えるが収入増に伴う生活環境向上への意欲が鼓舞され住み替えや自宅の新築増改築が実現し世代平均の居住床面積も広くなり、負傷危険度は低下する傾向にある。しかし、子供が独立し家を離れても、家具はそのまま実家に残置し、新居を構えるケースが多い。すなわち、親元は子供世代の家具の倉庫となっており、必要以上の家具数により危険度は然程低下していない。室内危険度は世代により異なっており、20 歳代をスタートに、働き盛りで子供がまだ養育期にある 30～40 歳代の世代が最も危険な室内住環境にあると言える。

図 18 は 1995 年阪神淡路大震災の年齢別死亡者数の分布である。実数として 50 歳代以上の中高年層の死者が多かったのは多く指摘されているところであるが、それに加えて 20 歳代前半の若者も多く犠牲者となっていた。これは神戸市内に下宿する他地域からの大学生の存在が大きい。比較的低家賃の下宿生活を求め既存不適格住宅に居住し、かつ周辺地域との希薄な近所づきあいにより犠牲となる確率が高かった世代が顕在化したと言えよう。同一人のライフサイクルにおいて、生活環境が危険に暴露されやすい年代、いわゆる世代間格差が存在している。

(4) 年齢格差

前項で指摘した世代の持つ社会的背景による格差ではなく、年齢による体力差に起因するリスク格差もある。

図 19 は 2004 年新潟県中越地震による死因別でみた年齢による死亡者数である。外的要因（外因死）による場合は、一般に年齢による体力差が死亡率を決定づける。嬰兒・幼児及び高齢者は災害回避能力が低く負傷しやすい。また、負傷程度が同じでも青年期に比較すると死亡に至る確率は高い。なお、嬰兒・幼児は親による保護の対象となつて死亡率が低い場合もある¹⁵⁾。

一方で、避難後に避難生活環境の変化による体調の乱れや持病の悪化により死に至るケースがある。これは震災関連死と言われ、同図に示すように、高齢者の死亡率が高い。被災後の避難所環境劣化に対して改善の自己主張をせず耐えようとする日本人高齢者特有の性格が禍いすること多い。

これらは人間を被災対象とみた時の脆弱性（Vulnerability）であり、体力的格差は世界共通ではあるが、下宿学生の住環境や高齢者関連死は日本独自の社会生活環境における格差（年齢格差）とも言えよう。

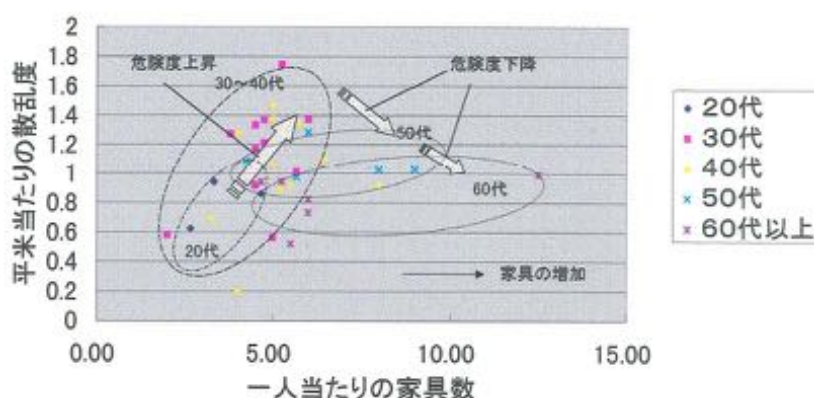


図 17 室内散乱危険度の世代変化

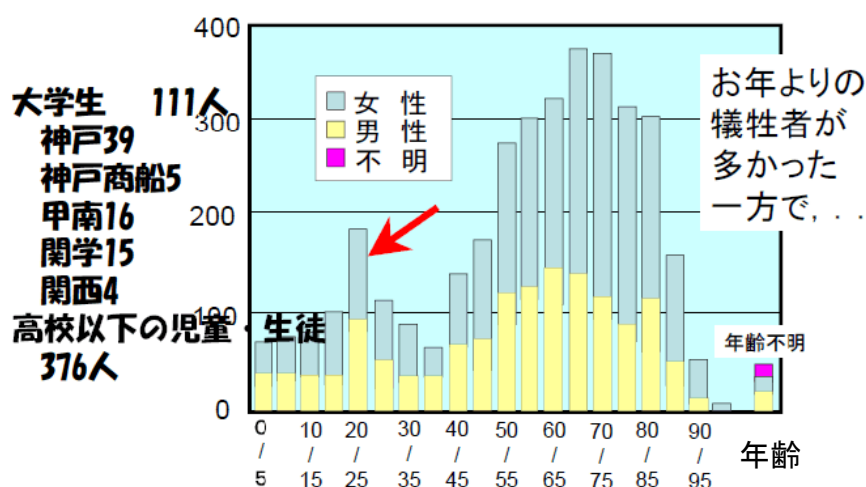


図 18 阪神淡路大震災の犠牲者の年齢別分布（目黒公郎氏提供）

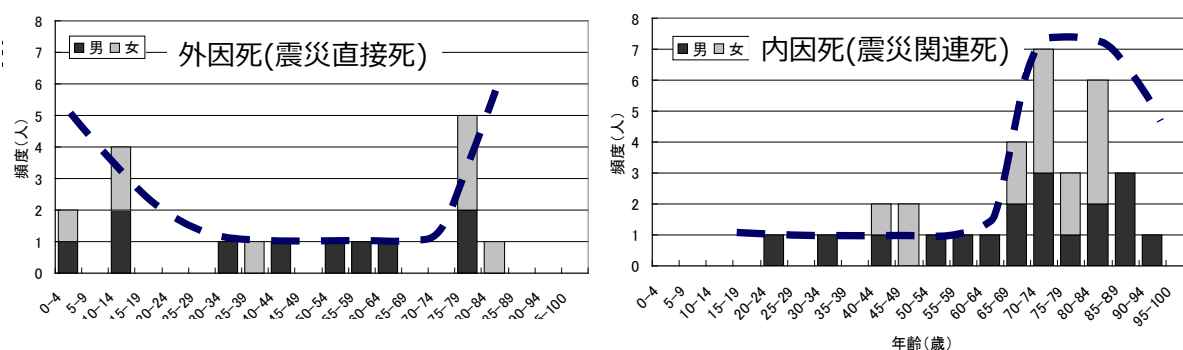


図 19 中越地震における犠牲者の死因別年齢分布 [西村 (2007) に加筆]

(5) 性別格差

図 20 は 2003 年十勝沖地震における浦河町の年齢別・性別負傷率を示している。この地震に依らず、一般に男女比で比較するなら、女性のほうが負傷率は高くなる。男女による体力差も一因ではあろうが、主たる原因は発災時における男女の役割差が大きいようである。災害発生時におけるヒアリング結果はそのことを端的に示しており、発災時の女性の行動の多さが負傷に直結している。調理熱器具の燃焼停止やガス器具の止栓・子供の保護・家具の転倒防止のための押さえなど、揺れている最中に移動し、多くの作業を行おうとする結果、自身の転倒や落下物により負傷している。日常生活における役割の多さが、災害発生時においても活発な行動に直結し、負傷している。平時の家庭内での役割や行動パターンが負傷のリスク格差を作り出していると言えよう。なお図 20 において 40 歳代の負傷率に男女逆転現象が見られるが、この地震は早朝の午前 4 時 50 分頃に発生しており、当研究室の実態調査により、就寝中の子供の様子を気遣う父親の移動行為が揺れている最中に多く見られた結果と推測される。暗い中での子供を気遣う父親の責任感（役割）が負傷原因となっている。

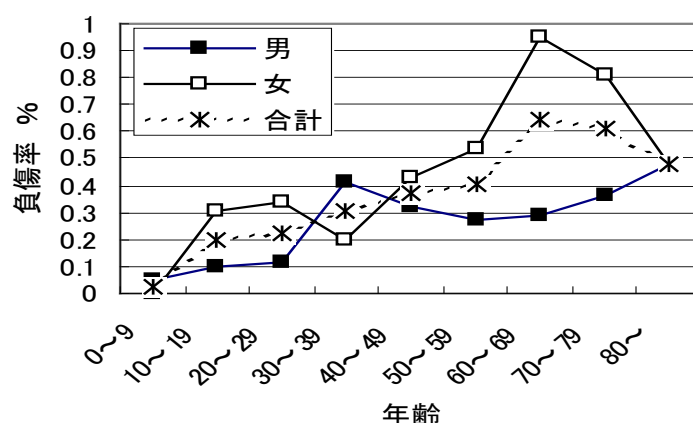


図 20 2003 年十勝沖地震における浦河町の性別・年齢別負傷率

(6) 時間格差

職場と自宅における負傷率を比較すると一般に、自宅での負傷率が高い。室内環境において、什器・火器等の危険物配置密度が高く雑多に存在するのが自宅であり、負傷危険性が高い。NHK の生活実態調査より、平時においては日中の時間帯 (8:00 ~ 18:00) の 10 時間は職場にいる確率が高く、残る 18:00 ~ 8:00 の 14 時間は自宅にいる確率が高い。これは時間格差であり、また就業率による男女世代間格差 (女性の方が危険度の高い自宅にいる確率が高いということ) でもある。

(7) 季節格差

季節による被害の差も大きい。図 21 は札幌市¹⁶⁾ が想定している 4 つの地震断層群に対する地震被害評価結果である。Hazard/最大震度及び震度分布 (は同じにもかかわらず被害評価に差があるのは、冬季における火災発生 (火気使用率や風速の違いによる延焼危険性の違い) による全壊 (全焼) 家屋数の増加と建物全壊に伴う酷寒の中での凍死者の推定が加わるからである。

(8) 時代格差 (1995 年格差)

時代格差とは、その時代背景が格差の原因となることをここでは言う。例えば、1970年代の高度経済成長期(世帯収入が増加し、耐久消費財の大量購入により家庭内における家具密度が上昇し、地震による負傷危険度が急上昇した時代背景(図22¹⁷⁾)や本稿で扱う1995年問題である。「4章自然災害の本質 (4) 歴史性と免疫性」の末尾で触れたが村上春樹は1995年を特別の節目として以下のような指摘をしている。「95年、日本という国は転換点を迎えました。(中略) それまでの日本人は楽観的でした。裕福になり幸福になっていましたから。でも、その頃から、何か致命的なミスをしたのではないかと日本人は自問自答するようになったのです。」1995年に何があったのか。地下鉄サリン事件と阪神淡路大震災である。しかし、それ以外にも以下のような重要な出来事があったと、(財)国土技術研究センター理事長・大石久和¹⁸⁾は著書で指摘している。

- 1) 生産年齢人口がピーク(人口減少・高齢化へ)
- 2) デフレ経済突入(税収の落ち込み)
- 3) 金融機関の経営破綻(銀行不倒神話崩壊)
- 4) 日米年次改革要望書に基づく構造改革(米国流規制緩和)
- 5) 日経連による短期雇用制度要求(非正規雇用開始)
- 6) 地方分権推進法成立(国と地方との対立構造)

そして、内閣府が毎年行っている「今後の生活の見通し」に関する世論調査において、1995年を境に、「悪くなっている」と回答した日本人が「良くなっている」と回答した日本人を上回り、その後その差は大きくなるばかりで逆転する気配は未だに見せていない(図23)。

【夏】

	最大震度	建物全壊数棟	建物半壊数棟	死者数人	重傷者数人
苫小牧沖	5強	427	1,176	0	13
野幌断層	6強	7,373	33,728	365	1,051
月寒断層	7	30,218	71,073	1,789	3,123
西札幌断層	7	18,377	49,044	1,048	1,910

【冬】

	最大震度	建物全壊数棟	建物半壊数棟	死者数人	重傷者数人
苫小牧沖	5強	427	1,210	0	14
野幌断層	6強	8,026	37,366	543	1,192
月寒断層	7	33,611	78,850	2,617	3,536
西札幌断層	7	20,336	54,300	1,536	2,169

図 21 札幌市における想定被害の夏季と冬季の比較



図 22 室内負傷発生危険度(家具転倒領域率)の時代変遷

大石は著作の中で、1995 年以降、日本における過去の経済成長・日本のシステムが全否定され、日本人に間違った価値観・人間観がすり込まれてしまったと分析している。それは、低経済成長が税減収とデフレをもたらし行政民間を問わず「削減」が合い言葉になり、人口減少と少子高齢化が東京一極集中を許容し「地方切り捨て」（＝「弱者切り捨て」）もやむなしという雰囲気が作り上げられ、新自由主義経済の台頭が日本社会に競争と短期評価（企業における四半期財務諸表報告の法制度化等）のシステムを導入させ行政民間問わず「短期的視点で改革」せねばならないという固定意識を植え付けてしまったようだと分析は続く。

筆者が属する建築界においても 1995 年は大きなうねりの始まりであったように思われる。それ以前は、たとえば 1948 年福井地震が建築基準法制定に繋がり、1959 年伊勢湾台風が災害対策基本法を制定させ、1968 年十勝沖地震が新耐震設計法の導入に繋がるなど、災害発生がその災害を克服しようという正なる動きに繋がっていた。しかし、1995 年を境に、耐震偽装事件や建築構造設計の基礎データ捏造が発覚したり、グローバル化の名の下にリスク軽視で経済効率優先の建築法制度（木材の耐火性能の規制緩和、仕様設計から性能設計への転換等々）が導入されたり、被災地復興後回しの首都圏優先まちづくりが提唱されるなど、災害発生と不穏な動きが連動し活発化しているように思われる。

すべてが、経済優先の弱者切り捨て・リスク格差の受容であり、増長の動きである。我が国の防災総合力が、1995 年を契機に低下の道を歩み始めたのかもしれない^{*1}。

(9) 復旧費用の負担感格差

被災者が感じる被害の重さを経済被害の観点から測るなら以下で計量できるであろう¹⁹⁾。

$$\text{被害の重さ} = \text{個人が負担する被害額 } D / \text{被災者の経済事情 (個人年収、保有資産) } M \quad (10)$$

被害は、個人においてはその保有資産によって、また地域自治体にあつてはその財政事情により、負担となる重さは異なるはずである。しかし公的な財政支援はその重さに斟酌することなく、被害の大きさ等により“公正”に支給される。式 (10) の観点からするなら被災した側の経済事情に配慮することこそ、血の通った“公正”な政策と言えるのではないだろうか。被害の重さを上式で計量するなら、住家被害に限定した場合個人が負担する被害額 D は以下のとおりとなる。

$$D = L - R - S - M \quad (11)$$

^{*1} かつての日本は中間層主体のホモニアス社会であったと 2 章「リスクの定義」脚注で既述した。しかし現在、社会構造が経済的に二極分化しつつあり、そのことがリスク格差にもつながってきている。日本社会の二極分化の原因については原丈人もその著作（「公益」資本主義，文春新書，2017）の中で、金融資本主義経済（ものづくりをサポートする事業資金提供を本来の役割とするはずの金融業がマネー自体を投機的役割とする仕組み作りに走り、何もつくり出さずにパイを奪い合うだけのゼロサムゲーム化する社会のこと）の限界・破滅性にあると指摘しており、日本社会の脆弱性が経済的にも問題視されている。

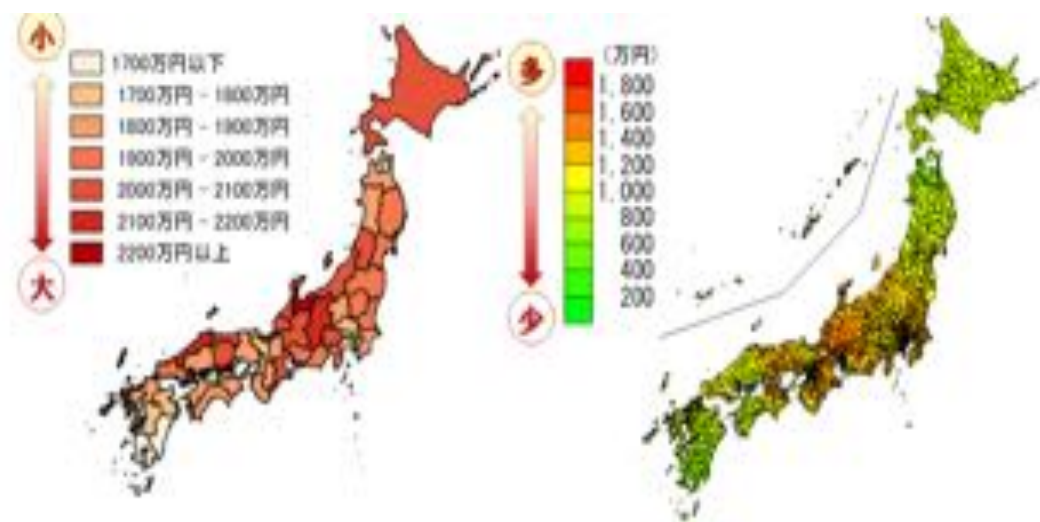


図 24 左) 都道府県別住家建設コスト (個人負債基本額) 右) 都道府県別世帯あたり平均貯蓄額

ここに、 L は住家被害額 ($L = H \times V \times C[\text{¥}]$)、 H は地震発生確率、 V は地域建築耐震性能、 C は住家建設費用である。 R は自治体からの被災者生活再建支援金[¥]、 S は自治体独自の被災者支援金、 M は個人資産であるが主として世帯貯蓄額を考える。このうち、 R 以外は地域性(被災者が居住する地域により受ける損益の違い)を持ち、大きな地域間格差として被災者に掛ってくる。既述したとおり、 H は

$Hazard$ 環境に関する地域間格差を、また V は $Vulnerability$ に関する地域間格差を与える。 C は住家の建設コストであり、住宅面積に加え建物の工法・建築材料調達費・建設人件費が関与し地域により大きく異なる。また M は年収や雇用機会の影響を受け、地域による格差が大きな社会問題となっている。都道府県別に算出した式(10)の分子(被災した時の住家再建コスト D)と分母(世帯あたり平均貯蓄高 M)を図24に示す。

地震の発生確率を考慮し各地域において50年10%の超過確率を与える地表面最大速度を防災科学技術研究所(NIED)の地震ハザードステーション(J-SHIS)より求め、これを入力とした時の被害の重さを式(10)で計算し、結果を図25(白棒グラフ)に示す。政令指定都市間の比較を行ったものであるが各都市の平均個人資産に対する被害額(個人の平均負債額)は地域差が大きく、首都圏～東海圏～阪神圏において負担割合が大きいことが分かる。ほぼ世帯貯蓄額内で被害負担可能との結論ではある。しかし、発生確率を無視し、予兆ではなく住家全壊被害が発生したとしたときの各世帯の被害の重さを赤棒グラフに示し、比較する。実際の負担額は各世帯の貯蓄額を大きく超え、しかも発生確率を考慮した負担感の小さな地域ほど、実際の被害の負担は大きい結果となっている。平均貯蓄額が少なく災害準備

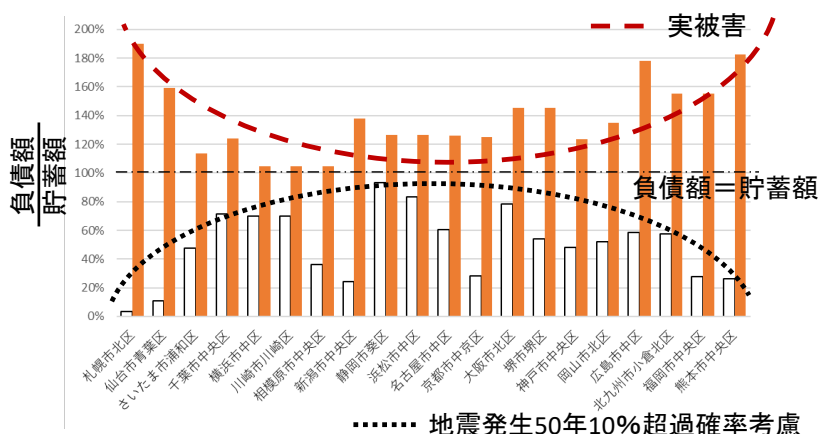


図 25 地域別の被害の重さ比較

に余裕のない地域ほど、皮肉にも建築コストが大きく被災時には大きな復旧負担を背負い込むことになる。災害弱者救済の立場に立つならば、このような地域格差に配慮した支援 (式 (10) の R と S) を考えることも、対策のあり方として必要かもしれない。

(10) モデル格差

上記に示してきた各種のリスク格差は、研究的にもその分析や解析において無意識に組み込み、格差受容の動きに与してしまう危険性があることに、防災に携わる研究者は留意すべきである。一例を示す。住宅の耐震性能は耐震評点で代表されることが多い。図 26 は日本木造住宅耐震補強事業者協同組合 (木耐協と略す) が調査した全国の耐震評点の分布を示している。図から分かることは、耐震評点は正規分布はしておらず、耐震評点の小さな危険側に多く偏ったべき乗型の分布をしているということである。弱者に偏った分布と言うことが言え、この分布から地域の耐震性能を評価することが多い。一般には地域の調査数が少ないため、対数正規分布を当てはめその形から耐震評点の小さな危険住宅の棟数等を推測している。同図下は北海道における 2009 年現在の木造住家の耐震評点調査結果である。調査数が少ないため、きれいなべき乗型の分布とはなっていないため、どのような確率分布を当てはめるかにより、地域の耐震性能の評価が大きく変わる。一般には、通常全国で当てはめる対数正規分布で代表させると思うが、防災の立場に立つならば、耐震評点の小さな住家を見落とすべきではない。対数正規分布は元データの中央値を再現するようにパラメータが決められるので、耐震評点の小さな危険な住家は過小評価する恐れがある。すなわち、対数正規分布は縦軸 y 切片が 0 となる漸近曲線であるので、横軸の耐震評点が小さな脆弱な住家は頻度が過小となる社会モデルである。当該地域を出来るだけ防災的に改修しようとの立場を取るならば、多少過大評価になるかもしれないが、 y 切片が 0 とならない離散ワイブル分布等で元データを代表させるか、対数正規分布を採用するなら負方向にシフトさせるなど評点の小さな棟数を見落とすことのないような研究スタンスが重要となろう。モデル化により無意識に格差を持ち込まないことも防災実務の立場からは大切な考え方と言えよう。

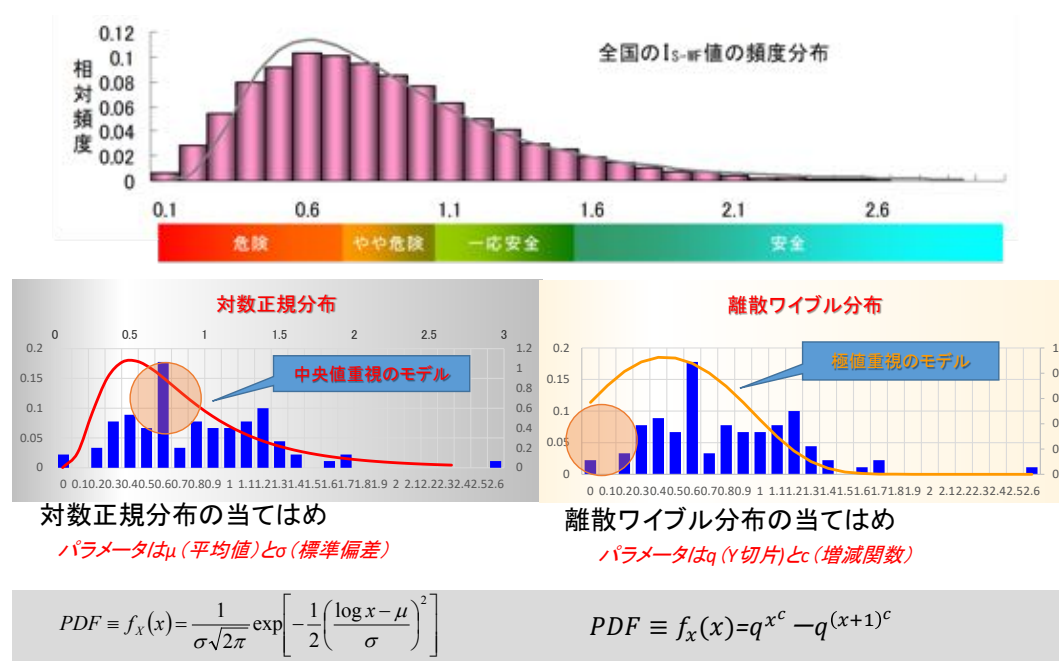


図 26 木造住宅の耐震評点の分布と北海道データの関数モデルの当てはめ

7. リスク認識の重要性 ～PCAG ステップの勧め～

最後に対策について触れておく。リスク格差により、危険なエリアに住まわざるを得ない者（不随意要因としての *Hazard* 環境の格差）、危険な住宅に住まわざるを得ない者（半不随意の要因としての風土環境の格差）、リスクを十分に認知できない者（社会生活環境の格差）、彼らは災害弱者と呼ばれる。*Hazard* と風土に関しては、人為的に制御できない側面もあり、これら主たる要因に経済格差が加わり不本意ながら自分では制御できないリスク環境に置かれている者は特に構造的弱者と言われる。彼らには国策としてのセーフティネットが用意されなければ解決の糸口はない。これについては終章で触れることとし、ここでは 3 つめの社会生活環境格差について指摘しておきたい。これはすなわちリスク非認知弱者でありリスク情報を持たない者であり、リスク情報を理解できない者たちである。すなわち、我々誰もがリスク非認知弱者になり得る。しかし彼らは自らの努力により克服可能であり、構造的弱者ではない。身のまわりのリスクを認知 (*Perception*) し、その実体を理解 (*Comprehension*) し、自らの防御力と比較評価 (*Assessment*) することである。それによって初めて具体的な対策 (*Governance*) が見えてくる。この PCAG ステップが対策の基本である。中でも、リスク認識については 5 章末尾でもリスクの格付けを固定化させないためにリスク格差の認識の重要性について触れたが、認識のステップが全ての始まりである。

一般的に業務マネジメントは PDCA (*Plan* (計画) - *Do* (実行) - *Check* (評価) - *Action* (改善)) サイクルのことを言うが、認識 (*Perception*) 及び理解 (*Comprehension*) ができているのが前提の改善サイクルである。災害対策は評価 (*Assessment*) と実践 (*Governance*) が PDCA のサイクルに相当する。その前段として認識と理解のステップが重要である (図 27 参照)。

8. おわりに ～格差対策のあり方私見～

リスク格差について解説してきた。リスク格差は様々な要因でもたらされるが、人間の社会生活の営みの結果であり、それが災害の本質であることが理解できたことと思う。人間は地域毎に様々な暮らしぶりを見せている。だから災害は地域毎に異なった様相を見せる。式 (2) がそのことを端的に示してい



図 27 対策の PCAG ステップと管理の PDCA サイクル

る。このことから一つの疑問が発生する。世の中 の動きはグローバル化が叫ばれて久しいが、地域性を特徴とする防災には世界標準 (global standard) はあるのか、ということである。私の結論は図 29 である。具体的な対策は地域依存 (de facto standard) で行うのが正解であろう。しかし、防災が目指すべき大局観 (perspective) は世界標準 (global standard) がある。それは、リスクをなくすことではなく、リスクの機会均等化にあると思う。人間が社会生活を営む以上、ゼロリスク社会は不可能であり、また社会学者 Starr の指摘のとおりリスクの受容限度 (Acceptable Risk の閾値) は絶対的なものではなく置かれた環境により変動することを考えると、リスクの絶対値、すなわちリスクを目標値で論じることは然程意味が無い。許容リスク値を基準値として確定することは、むしろ受容リスクをその社会が固定化してしまうことに繋がる恐れが発生する。リスクの機会均等化を目標にすることは哲学者ジョン・ロールズの大著「正義論 (紀伊國屋書店)」に記された「機会公正の均等原理 (自由競争を、スタート時点での公正性を条件に許容する原理)」と軌を一にする考え方である。

ここで 1 章の疑問に戻ろう。内閣府が提示した被害半減の目標設定は正しいのであろうか。ここまで述べてきたとおり、ただ単に、被害数を半減では、残る被害は弱者に集中するのみである。弱者は災害に対する回避能力が低い。それは個人の責任に依らない部分も多い。社会全体でのセーフティネットが必要である。リスク格差をなくすための努力を減災の目標とするのが、数の半減よりもより根源的な対策として存在しなくてはならないと考える。弱者救済を問題に挙げると、必ず、新自由主義経済学的考え方を持ち出す人がいる。弱者は自己責任であるとの立場である。新自由主義経済学者の主張はこうである。「過剰な支援は個人の事前対策のインセンティブを阻害し対策が進まなくなる。個人の経済活動の自由が最上位にあるべきであり、リスク軽減はその自由の中で個々人の判断と責任で行うべきである。これが自己責任論であり、社会全体での功利を考えるなら、弱者救済は悪平等がのび広がる。」合理的と思える主張ではあるが、弱者に未来のない考え方である。ここで一つの考え方が参考になる。ノーベル経済学賞を受賞したアマルティア・センの提唱する人間の安全保障の考え方である。市場原理主義という価値観を捨て、弱者救済ではなく災害により生活の安全が脅かされる誰もが負うリスク (個々人の人生設計の大きな変更を余儀なくさせること) を社会的に積極的に排除する発想への転換が必要な時であろう。

世界保健機関 (WHO) が健康の定義を行っている。健康とは身体的・精神的かつ社会的に全てが充たされた状態で、単に病気ではないことを意味するのではなく、人間としての尊厳及び生活の質が十分に確保された状態これを Well-being の状態という。筆者が考える Well-being とは、この WHO の定義に国連開発計画 (UNDP) の安全の定義^{*1}を加えたい。すなわち、身体的・精神的かつ社会的に全てが充たされた状態で、人間個人としての

防災に世界標準 Global standard はあるのか？

地震災害は地域性により特徴づけられるから…

- 対策は地域依存 de facto standard で！
 - － 風土の東西問題が住環境の違い (被害の違い) を生む。
 - － 生活の南北問題が対応の巧拙を生む。
 - － 生活の南北問題が情報リテラシー (情報へのアクセス能力・理解力・判断力・対応力) の違いを生む。
- 安全／安心の大局観 perspective は世界標準で！
 - － 災害をなくすこと？ … ×
 - － 災害を減らすこと？ … △
 - － 危険【理不尽さ】を平等化すること？ … ○

図 28 筆者の結論

^{*1} 国連開発計画 (UNDP) が定義する安全とは「人間の安全保障」を言う。人間個人が生きていく上での基本的権利が「自由 (欠乏や恐怖からの自由を含む) の保障」と「可能性の尊重」であり、それが守られている状態を安全という。

尊厳・基本的権利（自由「すなわち安全と安心」と可能性「すなわち未来の可能性」）及び生活の質が十分に確保された状態を言う。筆者が考える防災とは、「被害を防ぐ」という位置づけで考えるのではなく、災害時を特別視しない「普段からの Well-being」を実現するためのツールと捉えたい。リスクを減らすという一辺倒の考え方に立つのではなく、災害を弱者のみならず誰もが負う生活の安全を脅かすリスクと捉え社会的に公平に排除する（人間の安全を公正に保障する）ことを防災の原点に考えるなら、リスク軽減も自動的にかつ公平に達成されよう。実現は難しくとも、少なくとも目標として設定するに値する考え方であると思うが、いかがであろうか。

リスク格差公平化への対策提言については前章 (9)(10) 項で若干触れたが、3 章で概説した工学的制御の方法を活用したより詳細な具体的提言については別に稿を起こすこととし、ここで一旦筆を置く。

参考文献

1. 内閣府：平成 17 年版防災白書，国立印刷局，2005 年 7 月。
2. 赤井陽介：『進まぬ住宅耐震化 期限で達成、41 都道府県が「困難」』，2017 年 1 月 16 日 05 時 02 分朝日新聞デジタル。
3. 国土交通省住宅局建築指導課：平成 18 年 1 月 26 日施行 改正 建築物の耐震改修の促進に関する法律・同施行令等の解説，ぎょうせい，2006 年 6 月。
4. 岡田成幸・中嶋唯貴・小山真紀・松下孝星：コンピュータビジョンによるリアルタイム音声誘導システムの開発～地震時室内負傷低減のための多重対策の一環として～，地域安全学会論文集，13，213-221，2010。
5. 太田 裕：地域統計資料に基づく行政区別耐震性評価の試み-都道府県の場合-，自然災害資料解析，9，1-14，1982。
6. 高橋浩一郎：災害論 ～天災から人災へ～，東京堂出版，1977。
7. 岡田義光：東京の震度時系列，地震予知会報，66，2001。
8. 村上春樹：クーリエ・ジャポン，講談社，2010 年 11 月号。
9. Coburn A. and R. Spevce: *Earthquake Protection*, John Wiley & Sons Ltd., oo/955, 1992.
10. 河田恵昭・朴基顕・柄谷友香：社会の防災力の評価に関する一考察 ―巨大災害による総被害額評価方法への適用―，京都大学防災研究所年報，No.41，B-2，77-87，1998。
11. 古川俊之：寿命の数理，朝倉書店，pp.242，1996。
12. Ohta Y., H. Ohashi, and H. Kagami: *A Semi-Empirical Equation for Estimating Occupant Casualty in an Earthquake*, Proc. Of Eighth European Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Vol.2.3, p.81-88, 1986.
13. 岡田成幸・太田 裕：都市圏居住域の時間拡大性を考慮した地震危険性の長期評価－札幌圏を例として－，日本建築学会構造系論文報告集，389，10-20，1988。
14. 建設省建築研究所：伊勢湾台風による名古屋市の市街地および建築物の被害調査と防災計画，建築研究報告 No.33，pp.152，1960。
15. 太田裕・小山真紀：2011 年東日本大震災に伴う人間被害の激甚性 ―既往地震群との対比でみる死者発生 の年令等依存性―，日本地震工学会論文集 (Web) 15(2) 11-24，2015 年 5 月。
16. 札幌市防災会議：第 3 次地震被害想定について，2008 年 9 月 18 日。
17. 岡田成幸：地震時の室内変容に伴う人的被害危険度評価に関する研究 ―その 1 居住空間危険度マイクロゾーニングの提案―，日本建築学会構造系論文集，454，p.39-49，1993。
18. 大石久和：国土が日本人の謎を解く，産経新聞出版，pp.232，2015。
19. 岡田成幸・中嶋唯貴：震後復旧費用個人負担の地域格差，日本地震学会 2016 年度秋季大会（名古屋），S15-18，2016 年 10 月 5 日。
20. Starr C.: *Benefit-Cost Studies in Sociotechnical Systems, Perspectives on Benefit-Risk Decision Making*, The National Academy of Engineering, p.17-42, 1972.
21. ジョン・ロールズ：正義論 改訂版，pp.813，紀伊國屋書店，2010。

2016 年熊本地震後の空中写真を用いた 深層学習による建物被害分類

東京工業大学 環境・社会理工学院
釜ヶ谷悠馬・松岡昌志

Damaged Building Recognition of the 2016 Kumamoto Earthquakes Using Deep Learning with Aerial Photographs

Yuma Kamagatani, Masashi Matsuoka
School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

Abstract

In wide-area disasters such as earthquakes, quick grasp of building damage situation is important in order to become a decision-making material for recovery and reconstruction planning. Although there is a visual interpretation using aerial photographs as a method of grasping building damage after a disaster, it takes a great deal of time and labor and there is a limit to the damage that can be readable from the building appearance. Also, for the purpose of quickly grasping building damage, estimation of damage is attempted by image processing by machine learning, but it is limited to extraction of severely damaged buildings. In this research, we conducted Convolutional Neural Network (CNN) for the 2016 Kumamoto Earthquakes to learn images of damaged buildings in the aerial photograph, generated classifiers for building damage, and estimated the building damage level based on the field survey etc. Also, for the purpose of supplementing the point that not all damage parts can be judged from aerial photographs, estimated seismic intensity at the location of the building was added to the input of learning of CNN. As a result, it was shown that there is a possibility of detailed estimation of building damage degree based on the severely damage probability output from CNN.

1. はじめに

熊本地震のような広域的な地震災害では、建物被災状況の迅速な把握が復旧・復興計画、生活再建の判断材料になるために重要である。被災状況の調査は、調査員に知識や経験が求められ、ほとんどの場合、現地に赴くこととなるため時間がかかる。建物被害を早急に推定する方法として、被災地を観測した人工衛星や航空機からの画像を用いた目視判読やテキスト解析等の画像処理があるが、多大な時間と労力が必要であったり、抽出できる建物被害は甚大なものに限られたりしており、実用化には課題が残る。近年では、建物の空中写真と被害程度を Convolutional Neural Network (以下、CNN) により学習させ、被害建物を抽出する研究^{1),2)}が報告されている。しかし、CNN による建物被害推定は汎用性に課題があり、過去の地震被害のデータセットに基づき事前に学習した分類器を他の地震に適用する際には、地域による建物の特徴の違いなどにより十分な判別精度が得られない場合がある。そのため、CNN の実用化のためには、地震発生後に得られる被災地域の一部の被害情報を学習させ、その分類器を用いて被災地全域の建物被害を推定する方法が考えられる。

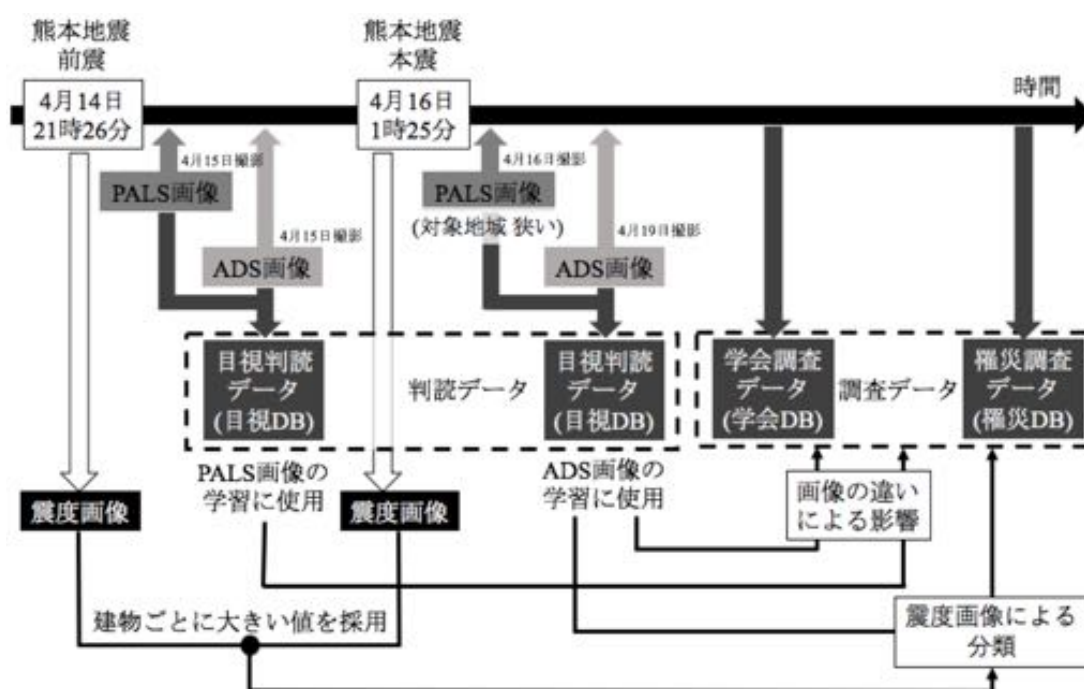


図1 使用するデータと CNN への入力組み合わせ

本研究では、地震発生後に建物を撮影した画像と、その画像に基づき目視判読した被害程度を学習させ、被害認定調査等の被害程度を推定することを試みる。目視判読は確認できる被害箇所が限られ、また建物内部の被害も確認できないことから、被害を過小に評価してしまう。その結果、学習させる被害と目標とする被害に差が生じてしまうことが予想される。そこで、建物の立地場所における推定計測震度から建物ごとに震度画像を作成し、建物画像とともに学習することで、被害程度を細かく推定できる可能性があることを示す。

2. 使用データと研究の流れ

本研究では、熊本地震にて多くの建物に被害が確認されている熊本県益城町役場周辺を対象地域とした。学習には4月14日に発生した地震（以下、前震）の後と、15日の地震（以下、本震）の後にそれぞれ撮影された2種類の空中写真（ADS画像・PALS画像）と目視判読データ（以下、目視DB）を用いる。学習後、罹災調査における被害認定調査データ（以下、罹災DB）、建築学会による現地調査データ（以下、学会DB）の2種類を用いて評価を行う。使用するデータとCNNへの入力の組み合わせを図1に示す。

2.1 空中写真

本研究で用いるADS画像は航空機からラインセンサと呼ばれる航空カメラから連続的に直下視撮影された画像で、オルソ化してある。PALS画像は航空機から斜めに撮影された画像である。各画像は、建物が収まる大きさに切り出した後、 256×256 ピクセルにリサイズをしている。

2.2 目視判読データと調査データの比較

目視DBとは岡田・高井³⁾により作成された建物破壊パターンチャート内のDamage Gradeを参考にADS画像とPALS画像から目視により被害を判読したデータである。本研究の目視DBで扱うDamage-

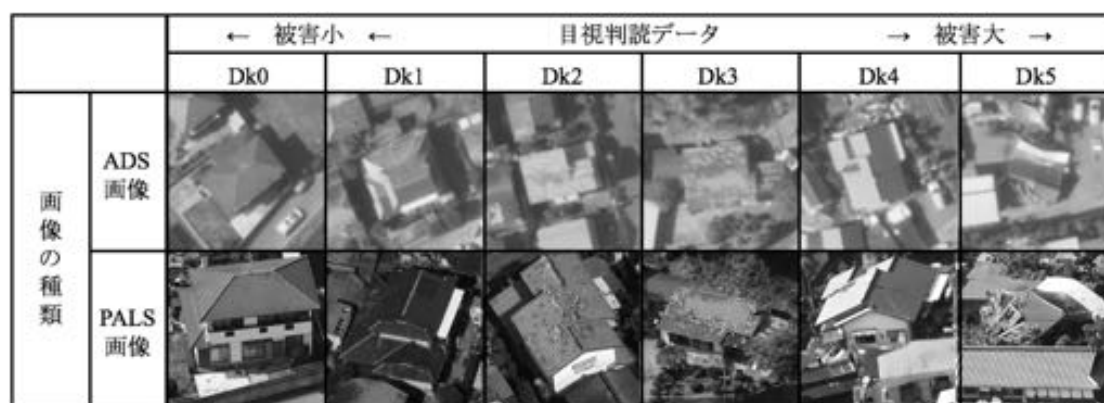


図2 目視判読データの各判読ラベルの画像例

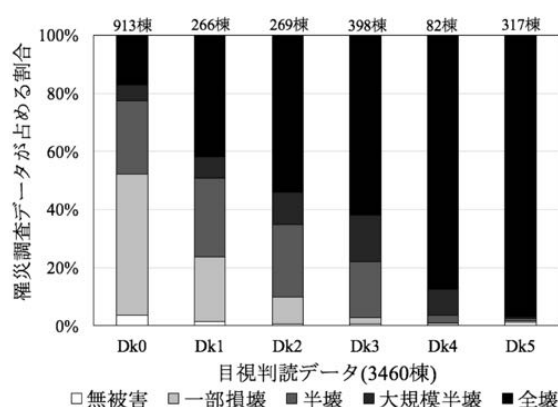


図3 目視判読データと罹災調査データの関係

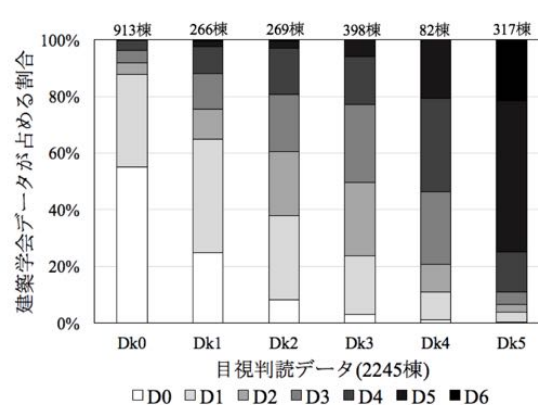


図4 目視判読データと建築学会データの関係

Grade は、「被害が確認できない建物」を「Dk0」、「壁面に亀裂・漆喰壁の小片落下」や「屋根瓦の一部が破損」を「Dk1」、「多くの壁に亀裂・漆喰壁の落下が目立つ」や「屋根瓦全体の 1/3 程度が破損」を「Dk2」、「ほとんどの壁に大きな亀裂・構造要素の一部が破壊」や「屋根瓦全体の 2/3 程度が破損」を「Dk3」、「壁面は重度の破壊・構造要素が連結性を失っている」や「屋根瓦のほぼ全てが破損及び一部が崩壊」を「Dk4」、「完全またはほとんど完全に崩壊」を「Dk5」とした。図2に各被害程度の例を示す。なお、前震後と本震後のそれぞれについて目視 DB を作成した。

罹災 DB は、「無被害」、「一部損壊」、「半壊」、「大規模半壊」、「全壊」の 6 つの被害程度に分けられている。被害程度は外観のみから行われたものと内部調査も行ったものが混在している。図3に本震後の目視 DB の被害程度に対する罹災 DB の被害程度が占める割合を示す。目視 DB の「Dk4」、「Dk5」は、罹災 DB における「全壊」が 95%以上を占めており、罹災 DB と目視 DB との対応は良い。しかし、「Dk0」から「Dk3」については罹災 DB の被害程度が混在している。

学会 DB は、Damage Grade を参考に菊池ら⁴⁾により行われた外観調査をまとめた被害程度であり、「D0」から「D6」の 7 段階で表される。「D6」は、「D5」の内、建物が「崩壊」しているものを表す。図4に本震後の目視 DB の被害程度に対する学会 DB の被害程度が占める割合を示す。「Dk5」の約 75%は学会 DB における「D6」であり、「D5」も含めると約 90%を占める。また「Dk0」は、50%以上が「D0」であり、「D1」を含めると約 90%を占める。しかし、「Dk2」から「Dk4」は罹災 DB の被害程度が混在している。罹災 DB および学会 DB は現地にて被害箇所を確認しているが、目視 DB は建物内部の被害や

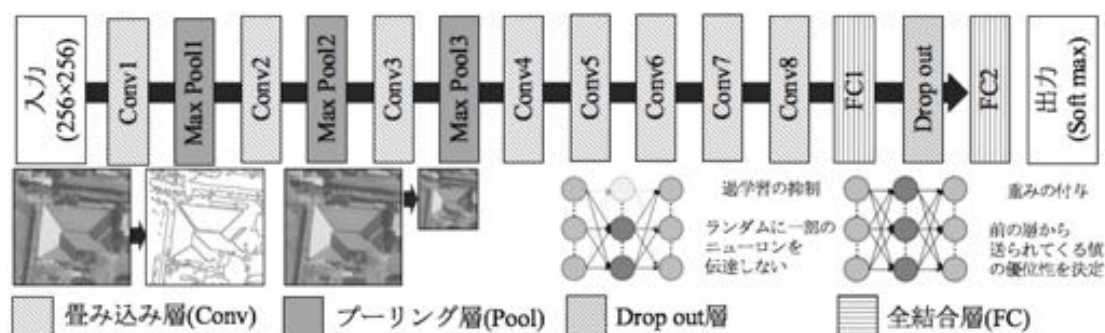


図5 本研究で用いる CNN の層構成

被害箇所が写っていないものがあるため被害を過小に評価したと思われる。これらより、本研究の CNN で学習に用いる目視 DB の被害程度は、他の被害程度に比べて信頼性が高い「Dk0」と「Dk5」を用いることとする。なお、各建物画像には1棟ごとに目視 DB、罹災 DB、学会 DB の被害程度を紐付けした。

3. ADS 画像と PALS 画像による学習と精度の検証

3.1. CNN と学習のパラメータ

CNN とは、画像識別において高い精度が報告されている深層学習手法であり、画像内の特徴を抽出する畳み込み層とその特徴の画像内での位置ズレを吸収するプーリング層をニューラルネットワークに組み込んだものである。本研究で用いた CNN の層構成を図5に示す。層構成とは別に学習に使用するハイパーパラメータは、ミニバッチサイズを 100 枚、学習の反復回数を 15,000 回、学習率を 0.001、減衰負荷係数を 0.0005、モメンタムを 0.9 とした。

3.2 データセットの作成

既往の研究^{1),2)}で行なわれている CNN の入力画像は、直下視画像と現地写真であり、現地写真は直

表1 ADS 画像と PALS 画像の使用する各画像の枚数

		目視判読データ						
		Dk0	Dk1	Dk2	Dk3	Dk4	Dk5	total
ADS 画像	学習 データ	261 →6264	0	0	0	0	261 → 6264	522 →12528
	検証 データ	262	0	0	0	0	262	524
	評価 データ	1479	424	433	554	125	527	3542
PALS 画像	学習 データ	66 →1584	0	0	0	0	66 →1584	132 →3168
	検証 データ	61	0	0	0	0	61	122
	評価 データ	2855 実棟数 638	921 実棟数 209	823 実棟数 175	1139 実棟数 251	317 実棟数 70	2269 実棟数 368	8324 実棟数

下視画像に比べて分類精度が高いことが報告されている。これは、建物壁面の被害の確認が写り込んでいるためと考えられる。そこで、ADS 画像（直下視）と壁面情報を含む PALS 画像をそれぞれ学習させ、PALS 画像が被害推定に有効かを確認する。

表 1 に使用する ADS 画像と PALS 画像の枚数を示す。「学習データ」とは、学習時に CNN に入力する画像である。今回は、過学習（学習により作成される学習モデルが学習画像に過剰に適合してしまい汎化性能が低下すること）を抑制する目的で 24 倍（90 度ごとに回転と鏡像反転、コントラストの増加と低下）の水増しをおこなった（水増した画像数は表内の「→」以降に表示）。「検証データ」とは、学習が繰り返される度に作成される学習モデルに入力する画像で、推定された被害程度と実際の被害程度とを比較し、この違いが少なくなるようニューラルネットワークの重みを決定するのに用いられる。これらとは別に、対象地域内のすべての建物画像から構成される「評価データ」を作成した。このデータを用いて、学習に用いた被害程度（「Dk0」と「Dk5」）の判別精度の検証を行うと共に、他の建物被害データ（罹災 DB と学会 DB）の判別の可否を明らかにする。ADS 画像と PALS 画像のどちらについても「評価データ」は本震後の画像を用いるが、「学習データ」と「検証データ」は、ADS 画像の学習は本震後の画像を用いるが、PALS 画像は本震後の撮影範囲が狭く、画像数が少ないため前震後の画像を用いた。

3.3 学習の推移と検証

図 6 に ADS 画像と PALS 画像の学習による判別精度と誤差の推移を示す。ADS 画像は、学習の反復が 9,000 回前後で判別精度がピークに達し、以降は 87% 程度である。PALS 画像は、学習の反復回数が 2,000 回程度で 85% 程度となり、以降は 80% 程度である。この違いは、PALS 画像は学習に用いている画

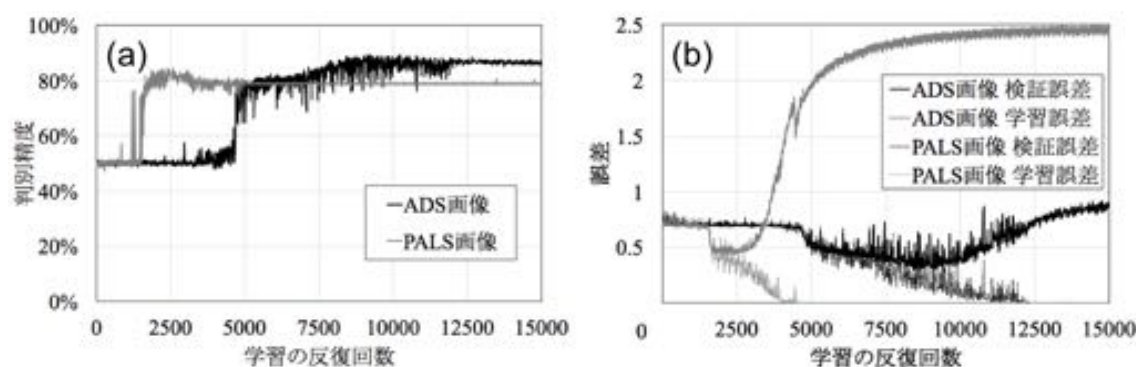


図 6 ADS 画像と PALS 画像の学習の推移, (a) 判別精度の推移, (b) 誤差の推移

表 2 各データセットにより作成した学習モデルによる判別結果（建物数）と建築学会データとの比較

		CNNによる判別結果											
		ADS画像				PALS画像				ADS画像+傾度画像			
		Dk0	Dk5	total	producer's accuracy	Dk0	Dk5	total	producer's accuracy	Dk0	Dk5	total	producer's accuracy
建築学会データ	D0	538	45	583	92.3%	282	55	337	85.7%	534	49	583	91.6%
	D1	434	132	566		293	48	341		468	98	566	
	D2	91	149	240		74	13	87		136	104	240	
	D3	100	167	267		123	28	151		136	131	267	
	D4	75	159	232		154	46	200		93	139	232	
	D5	30	189			158	50			34	185		
	D6	2	67	288	88.9%	41	23	208	24.0%	4	65	288	86.8%
	total (D0+D5+D6)	1268 (570)	908 (301)	2176 (871)		1125 (481)	263 (128)	1324 (545)		1405 (572)	771 (299)	2176 (871)	
	user's accuracy	94.4%	85.0%		91.2%	58.6%	57.0%		65.1%	93.4%	83.6%		90.0%

像の枚数が少なく、被害の特徴も少ないためであると考えられる。誤差は判別精度の上昇とともに低下した後、判別精度が安定する頃には、検証誤差が上昇を始めている。この現象は過学習と呼ばれる。そこで、ADS 画像の学習では過学習が始まる前の 8,600 回、PALS 画像の学習では 2,200 回の状態（学習済みモデル）を用いて評価用データの評価を行い、目視判読データおよび 2 種類の現地調査データの判別結果を比較した。

学習済みモデルに評価用データの画像を入力すると、その画像が何パーセントの確率で「Dk5」であるかを表す指標（以下、確信度）が出力される。この確信度が 50%以上を「Dk5」、50%未満を「Dk0」として判別結果をまとめた。一例として表 2 に学習済みモデルによる判別結果と学会 DB の被害程度との比較を示す。PALS 画像は、ひとつの建物を様々な方向から撮影しているため、同じ建物でも画像ごとに異なる確信度が出力される。本研究では、それらの平均値を用いることとする。学習時の判別精度（図 6 参照）では、ADS 画像と PALS 画像はどちらも 80%以上の高い値が得られているが、表 2 に示す学会 DB を評価対象にした場合には PALS 画像は ADS 画像に比べて判別精度が低いことがわかる。その原因として本研究で用いたデータセットの枚数が PALS 画像は極端に少なかったことが原因として考えられる。

4. 震度画像を追加した学習と精度の検証

4.1 データセットの作成

各建物の立地場所における計測震度の推定値⁵⁾から震度画像を作成し、ADS 画像とともに学習時に入力することで目視 DB からの学会 DB の被害程度の推定を試みる。震度画像の値は、計測震度を以下の式により 0 から 255 に変換している。なお、ADS 画像は 3 章で用いたものと同じである。

$$DN = \frac{255(INT - 5.0)}{7.5 - 5.0} \quad (1)$$

ここで DN は震度画像の値、 INT は建物立地場所における前震と本震の計測震度のうち大きい値、7.5 と 5.0 は建物被害が想定される計測震度の範囲の上限と下限である。

4.2 学習の推移と検証

図 7 に震度画像ありとなしの学習の推移を示す。震度画像を用いることにより、短い反復回数で判別精度がピークに達する。これは、1 回の学習で CNN に与えられる情報が増えたためであると思われる。表 2 の右欄には評価データにおける判別結果と学会 DB の被害程度との比較を示す。

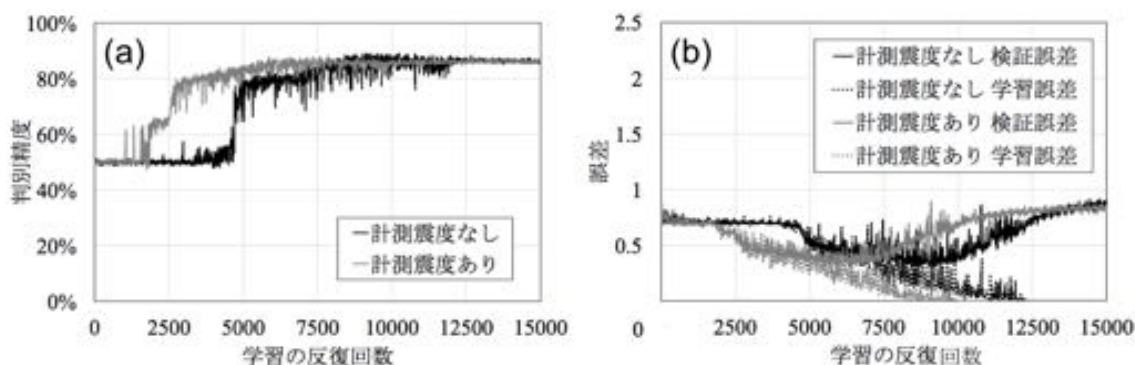


図 7 ADS 画像の計測震度ありとなしの学習の推移, (a) 判別精度の推移, (b) 誤差の推移

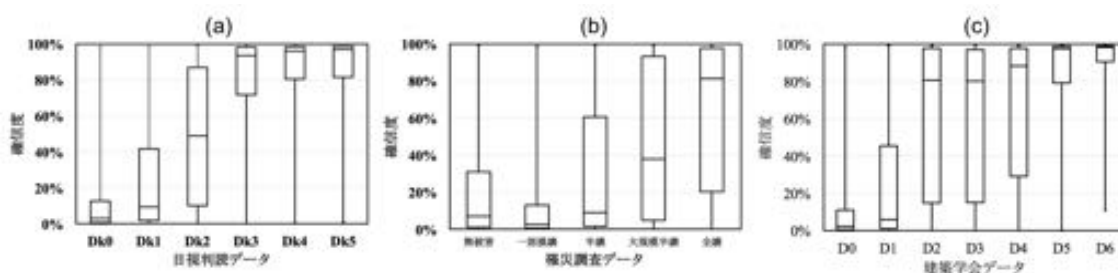


図8 ADS 画像による各評価データの分類結果, (a) 目視判読データ, (b) 罹災調査データ, (c) 建築学会データ

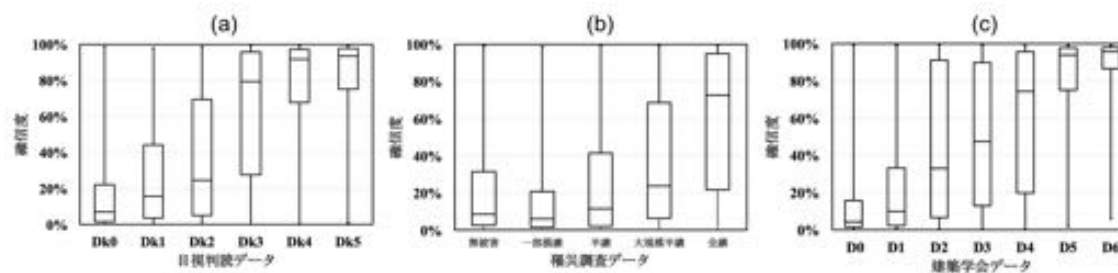


図9 ADS 画像+震度画像による各評価データの分類結果, (a) 目視判読データ, (b) 罹災調査データ, (c) 建築学会データ

確信度に 50%の閾値を設定して行う判別では、震度画像の有無にかかわらず ADS 画像による「D0」と「D5」&「D6」の判別精度は 90%程度であることがわかる。また、表2内の「D1」から「D4」において、「Dk5」と判別された被害棟数数の割合に注目すると、学会 DB の被害程度が大きくなるにつれて「Dk5」に判別される建物数が増えることがわかる。

5. 被害程度の細分化への試み

目視判読の「Dk0」と「Dk5」の画像のみを学習して、被害程度を詳細に分類することを目的に、「Dk5」への確信度と被害程度の関係を検討した。ADS 画像の学習済みモデルによる評価データの確信度と各 DB の被害

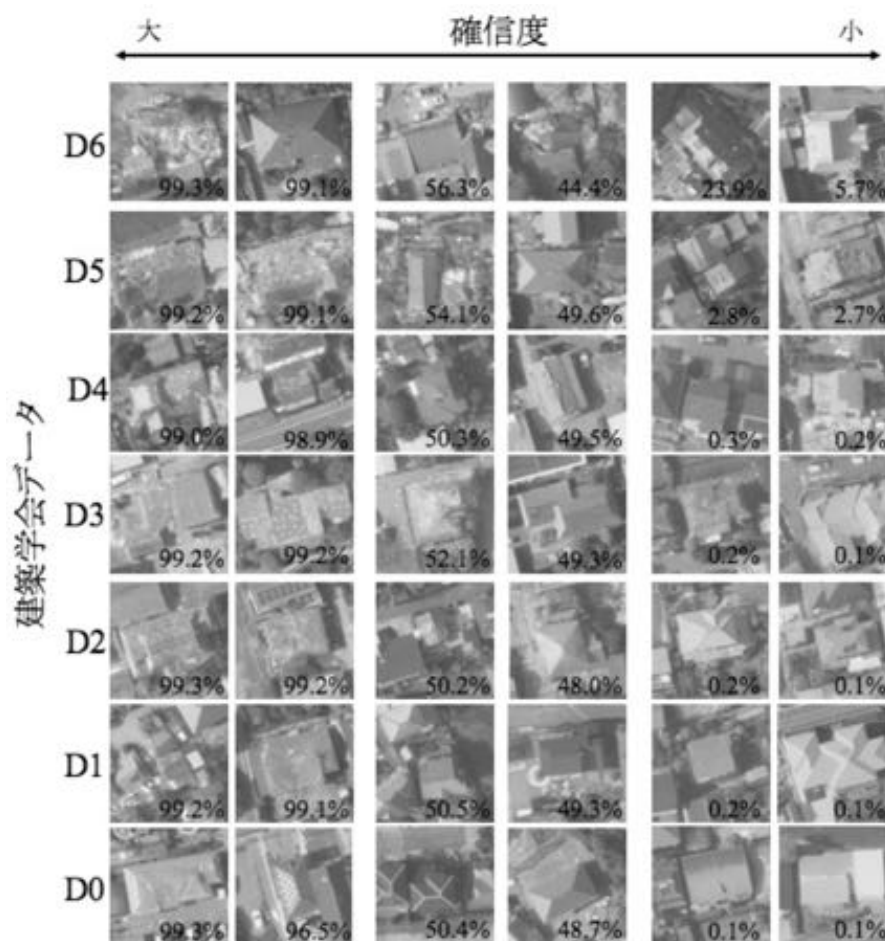


図10 学習済みモデルによる分類結果の例 (数値は確信度)

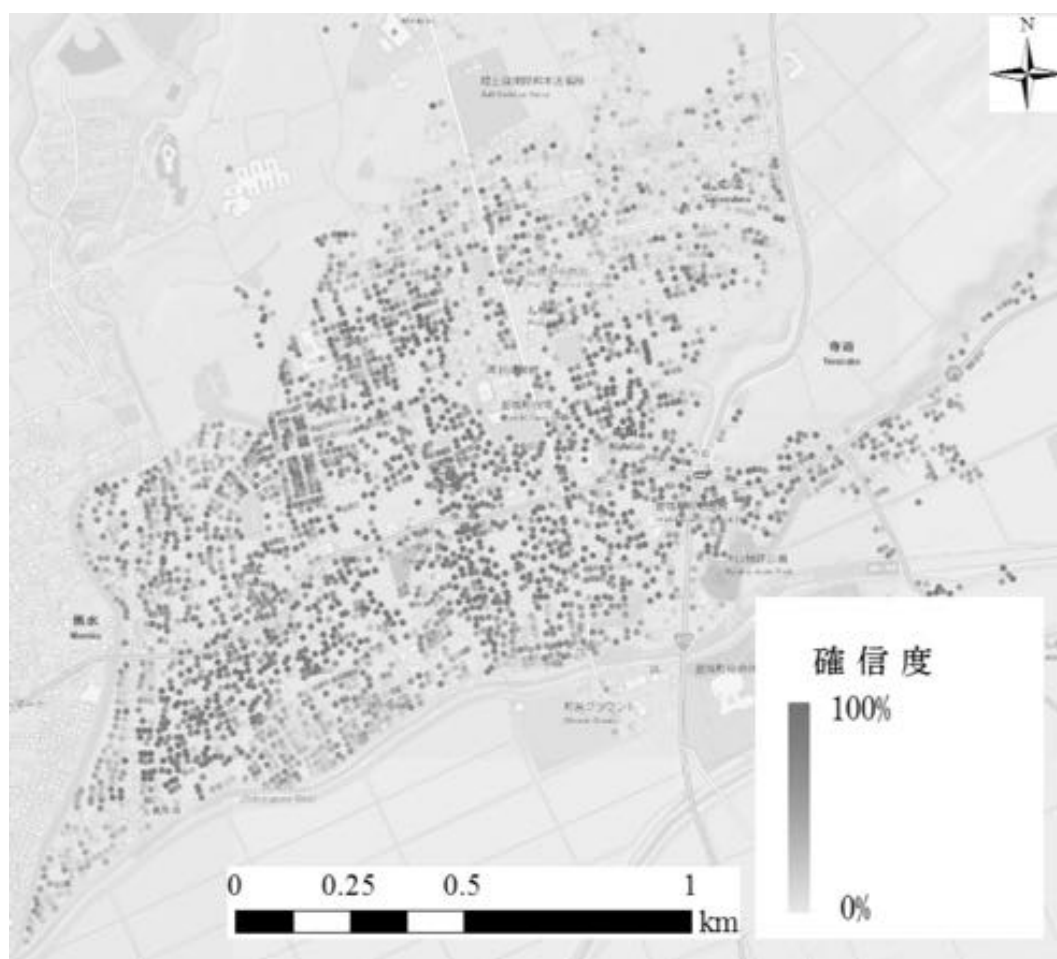


図 11 CNN による確信度の分布

程度を図 8 に、ADS 画像と震度画像の学習済みモデルによる評価データの確信度と各 DB の被害程度を図 9 に示す。罹災 DB への分類結果をみると、震度画像の有無にかかわらず、「一部損壊」の確信度は「無被害」の確信度よりも大きい傾向を示している。原因として、罹災 DB 内の「無被害」の枚数が極端に少ないためと思われる。学会 DB については、ADS 画像のみを用いた学習済みモデルによる分類において「D2」から「D4」の間に違いがほとんどみられないが、震度画像を加えた学習済みモデルでは、被害程度に応じて中央値にやや違いがみられる。そこで、ノンパラメトリックな有意差検定手法の 1 つである Mann-Whitney U test により、それぞれの確信度の傾向が、隣り合う被害程度との間に有意な差があるかを検定した。その結果、ADS 画像のみでは、「D2」から「D4」のそれぞれの被害程度の間には有意な差はみられなかったが、震度画像を追加することにより「D2」から「D4」の間に有意な差が生まれた。このことから、震度画像を加えることで、被害程度の細分化が行える可能性があることが明らかになった。

図 10 に学習済みモデルによる分類結果の例を示す。完全に倒壊している建物の確信度は、高い値を示している。一方、被害が小さい建物のいくつかにも高い値が示されている。原因として、学習には本震から 3 日後に撮影されたものを使用しており、屋根被害を受けた建物のブルーシートを被害の特徴として学習してしまったと考えられる。発災直後の画像を用いれば判別精度が向上すると思われる。図 11 に CNN による確信度の分布を建物ごとに示す。CNN の結果は建築学会 DB の被害分布と対応が良い。

6. まとめ

本研究では、熊本地震により被災した熊本県益城町を対象に ADS 画像と PALS 画像、目視判読データを用いて、CNN による学習を行い、調査データの分類を試みた。建築学会の調査データの Damage Grade における「D0」と「D5」と「D6」については、約 90%の精度で判別することができた。また、ADS 画像に震度画像を加えることで「D0」から「D5」の被害程度の間には確信度に有意な差が生まれることを明らかにした。よって、CNN より出力される確信度を用いて複数の被害程度への分類を行うことができる可能性を示した。

謝辞

本研究で使用した ADS 画像および PALS 画像は株式会社パスコから提供を受けた。また、益城町の被害建物悉皆調査データは日本建築学会九州支部より提供を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

1. 利根川凜、飯塚博幸、山本雅人、古川正志、大内東：被災がれき量推定に向けた画像解析を利用した倒壊建造物の自動抽出、FIT2015 (第 14 回情報科学技術フォーラム)、O-024、2015 年、pp479-480.
2. 石井友、松岡昌志、牧紀男、堀江啓、田中聡：兵庫県南部地震の現地写真を用いた深層学習による建物被災度判定、2017 年日本建築学会大会 (中国)、21208、2017 年、pp415-416.
3. 岡田成幸、高井伸雄：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、第 524 号、1999 年、pp65-72.
4. 菊池健児、田中圭：益城町の悉皆調査、2016 年熊本地震災害調査報告会資料、2016 年度日本建築学会大会 (九州) 災害部門 緊急報告会、2016 年
5. M. Matsuoka and N. Yamamoto: Web-based Quick Estimation System of Strong Ground Motion Maps Using Engineering Geomorphologic Classification Map and Observed Seismic Records, *Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering*, PaperID:4016, 2012.

ブレーキ操作に着目した地震時の車両挙動について

京都大学工学研究科 清野 純史

京都大学工学部 馬淵亮太郎

京都大学大学院 岩橋 卓也

Behavior of Vehicles During an Earthquake Focusing on Brake Operation

Junji Kiyono, Ryotaro Mabuchi, Takuya Iwahashi

Abstract

Probability of a large earthquake such as the coming Nankai-trough earthquake is extremely high, therefore sufficient attentions should be paid to the occurrence of severe accidents of vehicles on the highway. When such severe accidents actually occur, not only the damage of the accident itself but also the trouble of transportation route cause a delay of emergency response. The influence of earthquakes on running vehicles and the countermeasures to avoid such accidents have to be considered in advance.

In this paper, we developed a vehicle running model during an earthquake based on the experiments by using driving simulator. We conducted simulations by focusing on the brake operation which is highly relevant to the accidents. Collision rate of a car group is adopted to judge the factors which affect to the car behavior under seismic excitation. The difference of braking operation depending on the seismic intensity, reaction time depending on the age strongly affect to the collision rate. Automatic driving technology being developed rapidly was also considered for practical application during an earthquake.

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、太平洋沿岸の国道 45 号線は被災・寸断されたが、部分的に供用していた三陸沿岸道路等の高速道路は、過去に津波を考慮して高台に整備していたため、損傷がほとんどなく、発災後の国道 45 号線の迂回路や緊急輸送路として大きな役割を果たした。また、被災後に利用が制限された太平洋側の高速道路の代替として、日本海側の幹線道路網が物資の輸送ルートとして機能したなど、災害時に高速道路ネットワークが果たす役割がここでもまた再確認されることとなった。こうした地震においては、高速道路上での車両密度があまり高くなかったことから、車両の多重衝突等の大事故は確認されていないが、今後発生すると考えられている南海トラフ巨大地震や首都直下地震など、阪神高速道路や首都高速道路のような比較的車両密度の高い場所の直近での地震においては、車両の多重衝突のような大事故や側壁またはガードレールとの接触が発生する可能性が十分考えられる。先に述べた高速道路の被災地への復旧・復興物資の輸送ルート等の役割を考えても、高速道路上における多重衝突は、災害時の初期対応の遅れを引き起こしかねない。そのため、十分に事前の対策を考えておく必要がある。

高速道路のような道路延長線上に列をなしている交通流において、通常走行車両は前方車両との相対関係を調整することで、その交通流全体の安定性を維持している。しかし、地震が起きると、運転者の判断によりブレーキ操作を行うことが想定され、安定した交通流は乱れたものとなり、時には追突事故

等が起こることが考えられる。近年では高齢者の運転者による事故も増加しており、これは反応遅れが一因であると考えられる¹⁾。

本研究では村上ら²⁾の作成した追従走行モデルを活用して、高速道路上の10台の車両を想定し、事故との関連性が高いブレーキ操作に着目した研究を行う。まず高齢者の反応遅れ時間を考慮した場合の衝突確率がどの程度変化するかについて分析する。そして、近年実用化に向けて急速に進歩している自動運転技術を考慮した場合の車間距離と衝突確率について検討することを目的としている。

2. 解析モデル

2.1 車両の運動

座標は、車両の前後方向を x 軸、左右方向を y 軸、上下方向を z 軸とする。この座標を基準として、運動の自由度をそれぞれの座標軸における並進方向と回転方向の6自由度とする。回転運動に関して、 x 軸回りをローリング運動、 y 軸回りをピッチング運動、 z 軸回りをヨーイング運動に対応させている。これらの基本運動を図1に示す。6自由度の車両挙動を解析するにあたっては、図2に示すモデルを使用した。このモデルは自動車工学の分野で用いられているものである。図2において下のバネはタイヤの剛性を、上のバネはサスペンションのバネをそれぞれ表している。また、上の質点(バネ上)は車体本体質量を、下の質点(バネ下)は車輪質量を表している。車輪ごとの各パラメータはすべて等しいものとする。

2.2 ドライビングシミュレータ実験

村上らは、京都大学大学院交通情報工学研究室の協力のもとで図3に示すドライビングシミュレータを用いた実験³⁾(以下 DS 実験)を実施した。実験被験者は一般道週1回、高速道路月1回程度の運転頻度のドライバー 30 名とした。

被験者は、阪神高速道路を模した直線道路(片側2車線)の左側車線を走行することとし、被験者が地震発生地点を意識し、運転に影響が生じることを防ぐため、道路中に標識等のランドマークになるものは一切設置しなかった。また、被験者が地震発生区間に 80km/h で突入できるように並走または前方車両を設定して制御した。図4に車両の配置を示す。実験の種類は、震度 5.5 以下と 6.5 以上の横揺れの各場合において、前方車両が地震発生後に停車する場合と走行を続ける場合の計4種類とした。地震動は、図5のような片勾配道路を交互に走行させることによって片方のタイヤずつで順番に生じる段差乗り越えによって表現した。

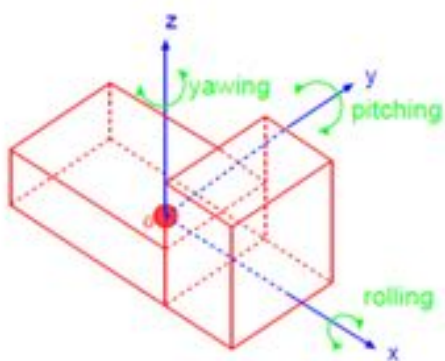


図1 車両の基本運動

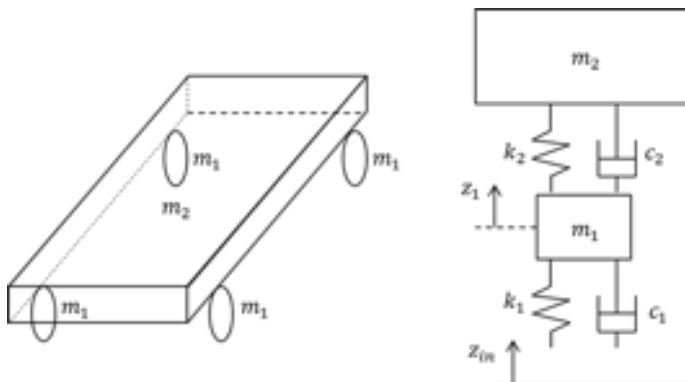


図2 車両モデル

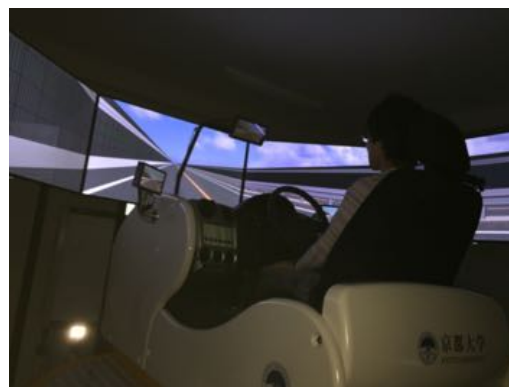


図3 ドライビングシミュレータ

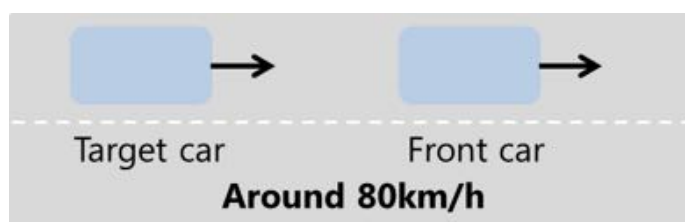


図4 DS 実験での車両の配置

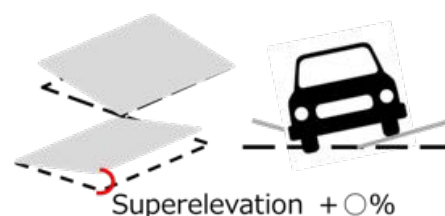


図5 片勾配道路

DS の運転席付近に固定設置した加速度ロガーを用いて、xyz の 3 軸方向の 0.1 秒刻みの加速度値を計測した。そして、計測された加速度値について計測震度階策定プログラムを用いて、計測震度を算出した。揺れの設定に関して繰り返しデータ収集を行い、計測震度階の設定を行った。

2.3 地震時車両走行モデル

村上らは、三宮ら⁴⁾の研究を参考にした追従走行モデルと DS 実験の結果を基に、地震動の影響を考慮した車両走行モデルを作成した。同モデルでは、追従走行のための力以外に地震時の減速力を追加することで、地震時車両走行を表した。以下に同モデル式を表す。

$$m\ddot{x}_i(t) = (1 - \alpha)(F_1 + F_2) + \alpha F_3 \quad (1)$$

$$F_1 = \alpha_1(|\dot{x}_i(t)| - \alpha_2)(|x_i(t)| - \alpha_3)x_i(t) \quad (2)$$

$$F_2 = \sum b_i(\gamma_{ij}) \frac{x_j(t) - x_i(t)}{\gamma_{ij}} + \sum c_i(\gamma_{ij}) \frac{x_j(t) - x_i(t)}{M_c} \quad (3)$$

$$\gamma_{ij} = |x_j(t) - x_i(t)| \quad (4)$$

$$F_3 = \frac{a}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

ここで、インデックスの i は追従車両、 j は先行車両を示す。式 (1) 中の F_1 は自車のみの前方推進力、 F_2 は先行車との相互間作用力を表し、その第 1 項は個体間誘引力、第 2 項は成群力を表す。 F_3 は地震時の減速力である。重み係数は、運転者がどの程度緊急時の運転に傾いているかを表す。同モデルでは DS 実験の結果を基に、 F_3 を正規分布で近似し、各車両のブレーキの強さから重み係数 α 、平均 μ 、標準偏差 σ の値を決定した。ここに μ はブレーキ操作後にブレーキ強さが最大値をとる時間である。ブレーキ

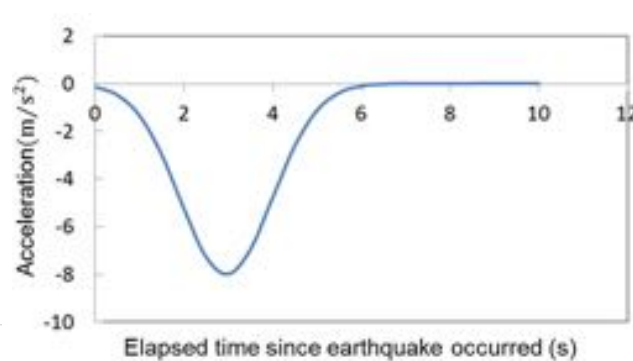
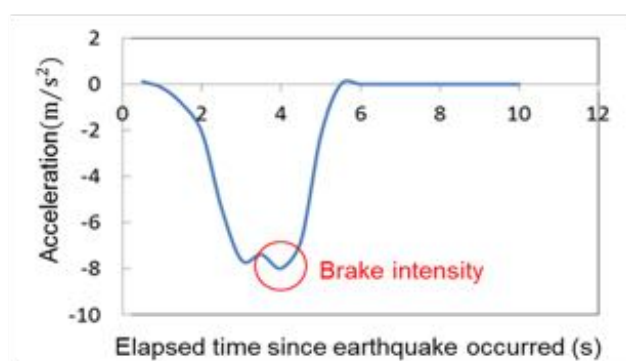


図6 ブレーキ強さの定義

図7 車両の加速度時刻歴 (モデル)

強さの定義を図6, 正規分布化したモデル例を図7に示す.

3. モデルにおける妥当性の検討

ここでは, 前述した地震時車両走行モデルがDS実験における被験者の運転特性を表現できているかを検証する.

3.1 解析条件

本解析では, 車両の台数はいずれの場合も先行車と追従車の2台とした. 図8に地震発生時点での車両の配置を示す. これらの車両の地震発生時点での速度は, 地震発生時点での車両の状況を解析と実験で一致させるため, 地震発生時点での両車の速度が約80km/hとなるように設定した. さらに, 地震発生後の先行車

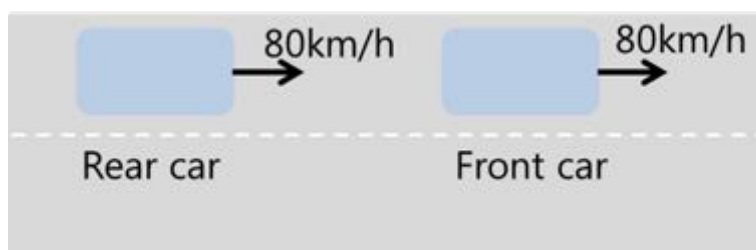


図8 地震発生時点での車両の配置

の速度は, 実験と同様に前方車両非停車の場合は80km/hを維持, 前方車両停車の場合は $-3.951m/2^2$ の加速度で減速するように設定した. また, 車間距離に関しても, 地震発生時点での車間距離が実験と一致するように初期の車間距離を設定した. 解析のケースとしては, 前方車両非停車と前方車両停車の各場合において追従車のブレーキの強さが $-4, -6, -8m/s^2$ の計6ケースとした.

3.2 解析とDS実験との比較

地震時車両走行モデルの妥当性を検証するにあたって, 解析で得た地震発生後10秒間の車間距離の時間推移と, 実験で得た地震発生後10秒間の車間距離の時間推移を比較した. 図9左側に前方車両非停車の場合の解析と実験の車間距離の時間推移を, 図9右側に前方車両停車の場合の解析と実験の車間距離の時間推移を示す. いずれの図においても, 図中の黒の太線が解析で得た車間距離の時間推移を, 他は全て実験で得た車間距離の時間推移を表している. 図から, 追従車のブレーキの強さが強くなるにつれ, 車間距離のひらき方が大きくなるといった特徴は再現できているといえる. また, 図10を見ると, ブレーキの強さがの場合車間距離が縮まり, ブレーキの強さがの場合車間距離がほぼ一定になるといった特徴も再現できているといえる. さらに, 式(6)を用いて解析と実験の車間距離の時間推移との

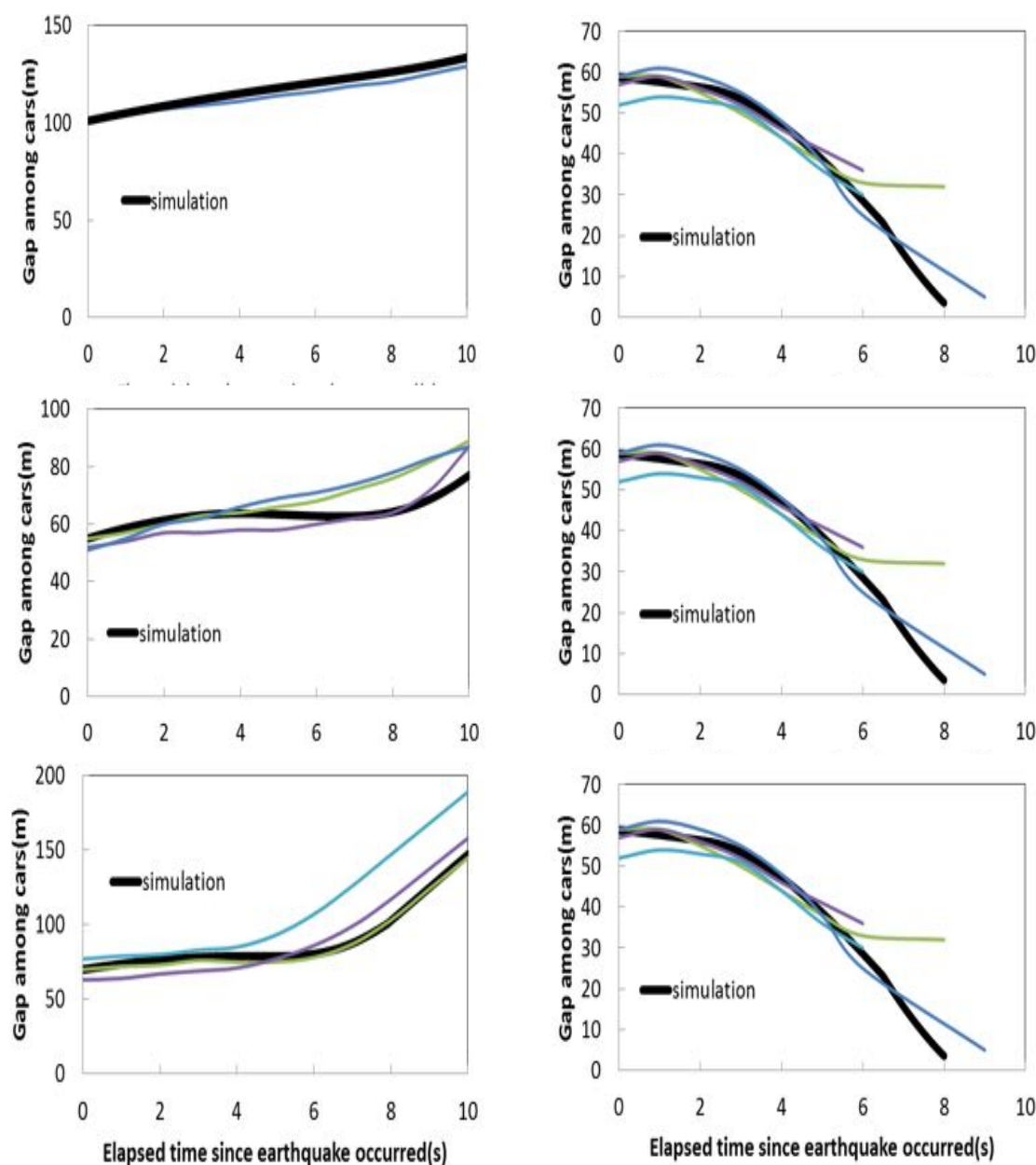


図9 解析と実験による地震発生後10秒間の車間距離の時間推移の比較。左) 前方車両停車の場合、上) 追従車のブレーキの強さ -4m/s^2 、中) 追従車のブレーキの強さ -6m/s^2 、下) 追従車のブレーキの強さ -8m/s^2 。

間の誤差を算出した。

$$\Delta \varepsilon = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{(s_{data} - s_{sim})^2}{s_{data}^2}} \quad (6)$$

式(6)中の $\Delta \varepsilon$ は実験と解析との誤差、 N はデータ数、 s_{data} 、 s_{sim} はそれぞれ実験と解析の車間距離の時間推移を表す。また表1に本研究で用いた車両モデルのパラメータ値を示す。

その結果、解析と実験との誤差は15%の範囲であることが分かった。この誤差の大きさに関して Arne Kesting⁵⁾らは、30%以内の誤差は既往の研究で提案されている車両走行モデルが含む誤差の範囲内であ

ると述べている。そのため、本研究の地震時車両走行モデルも従来の車両走行モデルと同程度の精度は見込むことができると考えられる。

4. 地震時の車群挙動解析

4.1 10 台での車群挙動解析

4.1.1 解析条件対象とする車両は走行車線に 5 台、追越車線に 5 台の計 10 台とした。図 10 に車両の配置を示す。車両の初速度、初期車間距離は平均、標準偏差の正規乱数で与えた。入力地震動は、図 10

に示す車群の先頭の車両が従う、地震発生後ブレーキ強さが最大値を取る時間とブレーキの強さの関係を表す関数が震度 6.5 以上と震度 5.5 以下の場合で区別されることから、震度 6.6 と震度 5.1 の入力地震動を用いた。図 11 左に計測震度 6.6 の入力地震動、図 11 右に計測震度 5.1 の入力地震動を示す。図に示している入力地震動は橋梁の最も端のノードの加速度応答であり、それぞれの車両への入力地震動に関しては、各車両の位置と速度に応じて異なっている。車両の初速度、初期車間距離およびなどの初期条件を 1 つの解析につき 100 パターン作成し、ブレーキ強さに関しては全車両でそろえた場合と図 12 のように確率分布に従って決定した場合を考えた。そして、各車両間の衝突回数を求め、同一車線上の車両 No.1 と No.3 のような追突が起り得る組み合わせの総数・隣同士の車線における車両 No.1 と No.2 のような側面衝突が起り得る組み合わせの総数・各車両と側壁の組み合わせの総数の和で割ることで、衝突確率を算出した。

4.1.2 解析結果

図 13 は震度 6.6 の場合と震度 5.1 の場合における衝突確率を比較したものである。図において縦軸は衝突確率、横軸はブレーキの強さの絶対値となっている。横軸のブレーキの強さの絶対値 4、6、8m/s² の場合は、全車両が共通して横軸に示されたブレーキの強さを持つことを、mix は図 12 の確率分布にしたがって正規乱数で与え、全車両が車両ごとに異なるブレーキの強さを持つことを表している。

青の棒グラフが震度 5.1 の場合、赤の棒グラフが震度 6.6 の場合の衝突確率を表している。衝突は、全てのケースで同一車線内での追突のみであった。ブレーキの強さが 6,8 m/s² および mix のとき、震度 5.1 における衝突確率の方が震度 6.6 における衝突確率よりも大きくなっている。これは、本解析において車両ごとの入力地震動の違いを考慮しているためだと考えられる。すなわち、地震時の減速力 F_3 は、各車両において入力地震動が初めて 50gal を超えた瞬間に作用し始める。この 50gal を初めて超えて F_3 が作用し始める時間の車両ごとの差が震度 6.6 の場合と比較して震度 5.1 の場合の方が大きく、このブレーキを踏み始める時間の差の違いによって、震度 5.1 のケースの方が震度 6.6 のケースよりも高い衝突確率を示したと考えられる。ブレーキの強さが 4m/s² の時は衝突は起

表 1 本研究で用いた車両モデルのパラメータ値

普通乗用車		
m_1 (km)	バネ下質量	100(4 本で)
m_2 (kg)	バネ上質量	1,150
l_a (mm)	先端と前輪軸間の距離	522.5
l_b (mm)	後端と後輪軸間の距離	522.5
l_f (mm)	前輪軸と重心間の距離	1,175
l_r (mm)	後輪軸と重心間の距離	1,175
L (mm)	車両全長	3,395
h_0 (mm)	車両静的時の重心高	350
d_1 (mm)	トレッド(前輪)	1,280
D (mm)	車両全幅	1,475

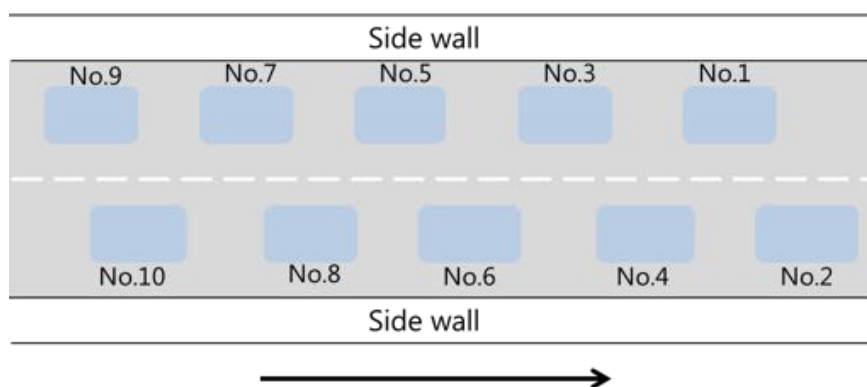


図 10 車両の配置

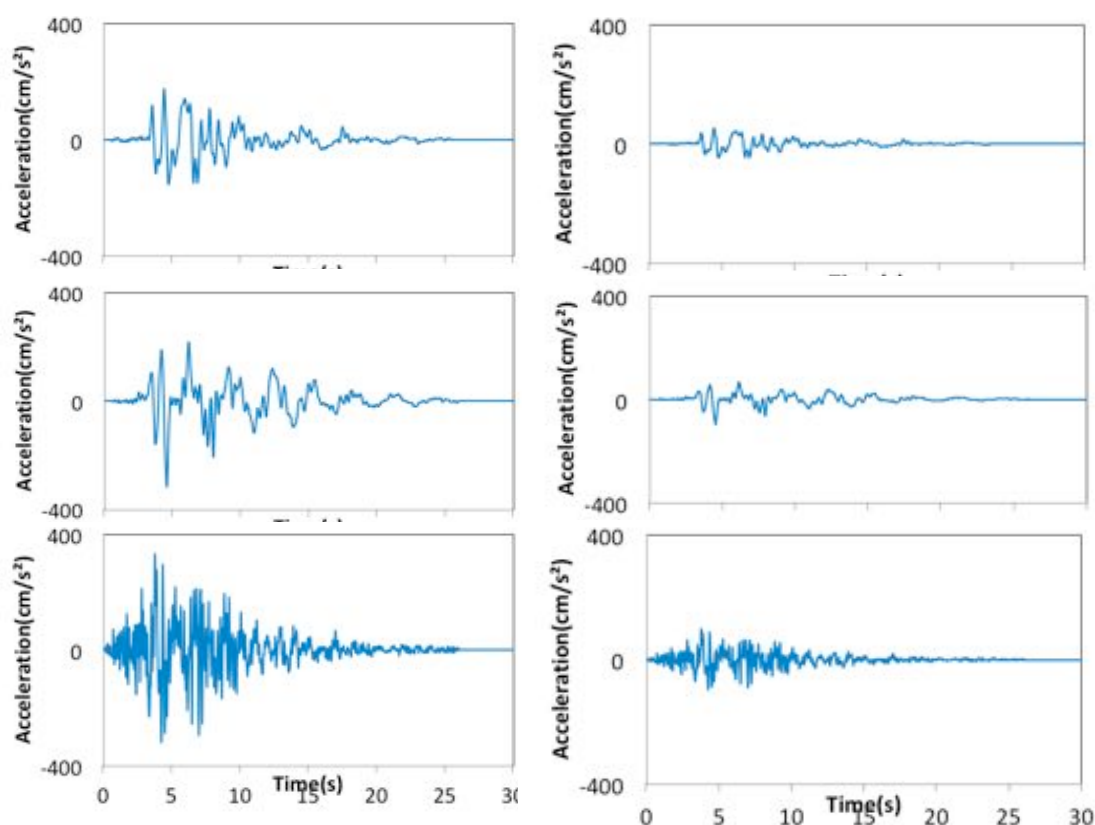


図 11 入力した計測震度 6.6 と 5.4. 左) 入力地震動計測震度 6.6, 右) 入力地震動計測震度 5.1, 上) 進行方向, 中) 進行直角方向, 下) 鉛直方向.

きなかった。これは、ブレーキの強さが 4m/s^2 の場合、前後でブレーキを踏み始める時間の差があっても、衝突を回避できるブレーキの強さといえる。

4.2 自動運転を想定した車群挙動解析

4.2.1 解析条件

対象とする車両は走行車線に 5 台、追越車線に 5 台の計 10 台とした。車両配置は前章の車群挙動解析と同様である。ここでは自動運転技術が全車両に搭載されていると仮定して、地震時までは安定な車群が形成されていると想定する。すなわち、地震発生時の車間距離および速度を揃えることで安定な車群を再現する。そのため初期条件として、走行車線は全車両 80km/h 、追越車線は全車両 100km/h の速度を与え、初期車間距離を 50, 60, 70, 80, 90, 100 m とし地震時までこの関係を維持するようにする。そして 50gal を超えたら従来通り図 12 に示すような分布に従う正規乱数を発生させ、各々の車両にブレーキを作用させる。ブレーキの強さについての条件を 1 つの解析につき、100 パターン作成し、各車両間の衝突回数を求めることで、衝突確率を算出した。

4.2.2 解析結果

図 14 は計測震度 5.1, 図 15 は計測震度 6.6 の場合における衝突確率を車間距離で比較したものである。図において縦軸は衝突確率、横軸は初期車間距離となっている。どちらの場合においても、車間距離が広がるにつれて衝突確率が低下する傾向が見られたが、計測震度 5.1 では 90m より 100m の方が衝突確率は高かった。これより、車間距離が広がることでランダムなブレーキ操作でも衝突を回避できる可能

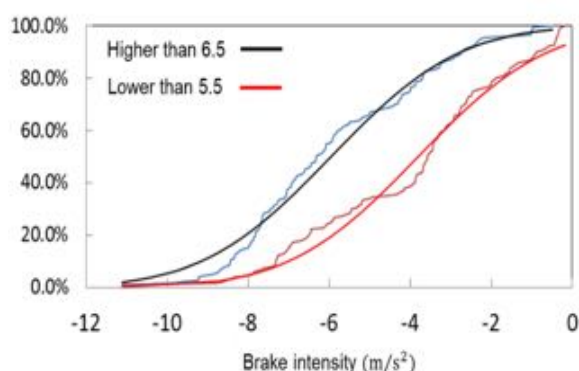


図 12 ブレーキの強さの累積分布

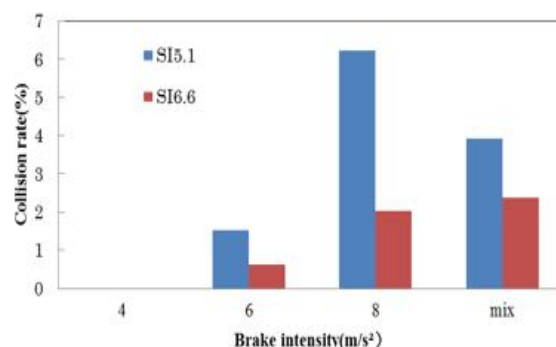


図 13 震度による衝突確率の比較

性が高いと言える。90m より 100m の方が衝突確率は高かったことに関して、現モデルでは車間距離が速度の 4 倍（約 90m～100m）を超えると、追従挙動の範囲外とし、先行車との相互作用による力（ F_2 ）をうけなくなることが影響していると考えられる。また、全パターンにおいて衝突がなくなることはなかった。これより、高速道路を走行する際に推奨されている「自車の速度と同じ値の車間距離」を取っていてもブレーキの操作によっては衝突をする可能性が十分あると言え、全車両に自動運転技術が搭載されていても地震時のドライバーの判断によるブレーキ操作によっては、事故につながる可能性があると言える。

4.3 高齢者の反応遅れ時間を考慮した車群挙動解析

4.3.1 解析条件

ここでは Makishita ら⁶⁾の研究より、高齢者は若年者よりブレーキ操作の反応時間が約 0.52 秒遅れることが分かっており、特定の車両におけるブレーキの力、つまり F_3 の開始時刻を 0.52 秒遅らせることでその影響を考慮するものとする。今回は反応が遅れることで衝突確率の変化に大きく寄与すると考えられる図 11 中の No.3,4,7,8 に関して高齢者を想定し 0.52 秒遅らせて解析を行った。車両の初速度、初期車間距離、ブレーキの強さなどの初期条件を 1 つの解析につき 100 パターン作成し、衝突確率を算出した。

4.3.2 解析結果

図 16 は計測震度 5.1、図-17 は計測震度 6.6 の場合における衝突確率を高齢者の有無で比較したもので

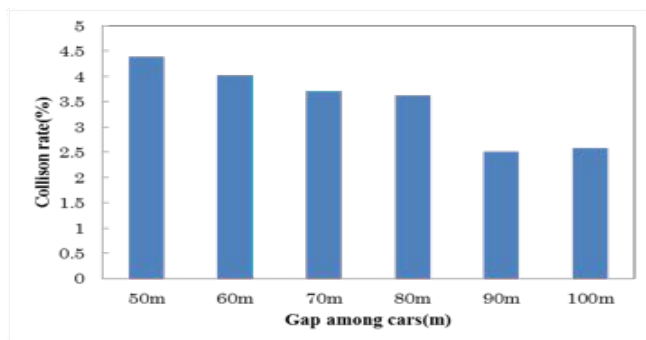


図 14 車間距離をそろえた場合の比較 (計測震度 5.1)

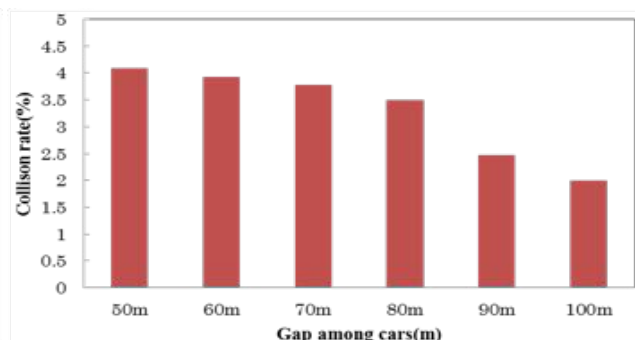


図 15 車間距離をそろえた場合の比較 (計測震度 6.6)

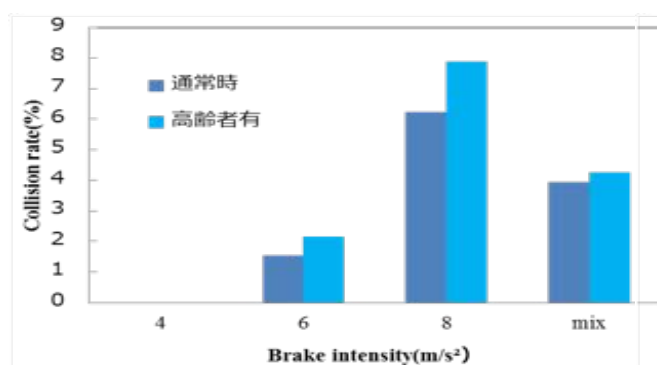


図 16 高齢者の有無による比較 (計測震度 5.1)

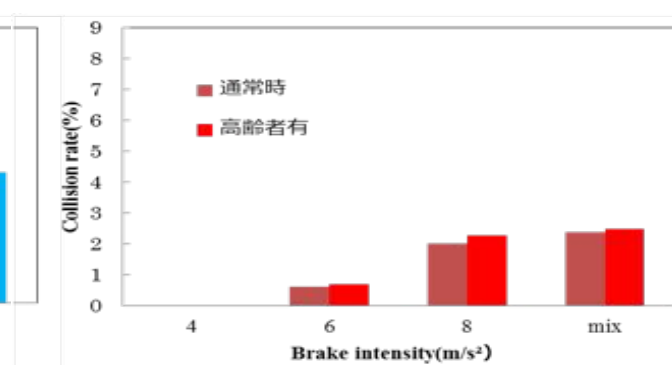


図 17 高齢者の有無による比較 (計測震度 6.6)

ある。すべての場合において、高齢者が含まれているケースの方が衝突確率は高い値を示した。これはブレーキを踏み始める時間が遅れたことにより車両はその分前に進んでしまい衝突回数が増加したことが原因と考えられる。またどちらの計測震度においてもブレーキ強さ- 8m/s^2 が最大の増加率を示し、計測震度 5.1 においては約 30%増加した。これは、正規分布モデルにおいてブレーキ強さは約 3 秒で最大値を取るため、0.52 秒の遅れの寄与が極めて大きく、強いブレーキ操作における反応遅れの影響は大きいと考えられる。またブレーキ- 4m/s^2 強さで衝突確率は変化せず衝突は起きなかった。これは、ブレーキ強さ- 4m/s^2 はで最大値を取るため、0.52 秒遅れても事故にはつながらず、弱いブレーキ操作においては反応が遅れても衝突する可能性は低いと言える。

まとめ

本研究では、地震時車両走行モデルを用いて、DS 実験の走行記録から得た車間距離の時間推移データと比較することで妥当性を検証した。そして、モデルを用いて地震動を考慮した高速道路上において車群挙動解析を行った。本研究の結論は以下に示すとおりである。

1. 本研究で用いた地震時車両走行モデルは、DS 実験の走行記録に見られる追従車のブレーキが強くなるにつれ車間距離のひらき方が大きくなっていくという特徴を再現できていた。また、DS 実験の再現解析で得られた車間距離の時間推移と実験の走行記録から得られた車間距離の時間推移との間の誤差を算出したところ、従来の車両走行モデルと同程度の精度は見込める誤差の範囲内であった。
2. ブレーキの強さが 6.8m/s^2 および mix のとき、計測震度 5.1 における衝突確率の方が計測震度 6.6 における衝突確率よりも大きくなった。これは、本研究で用いたモデルでは、ブレーキを踏み始める時間の差の違いが計測震度 5.1 の方が大きいため、計測震度 5.1 のケースの方が計測震度 6.6 のケースよりも高い衝突確率を示したと考えられる。またブレーキの強さが 4m/s^2 のときは衝突が起きなかったことから、安全なブレーキ操作であると言える。
3. 初期車間距離を設定し、地震時までそれを維持する車群について挙動解析を行った。これは自動運転技術が普及した場合を想定しており、地震時は人間の判断によりランダムなブレーキ操作を行うという条件で分析した。その結果車間距離が広がるにつれて衝突確率は減少したが、安全な距離を取っていてもブレーキの操作によっては衝突する可能性が十分あることがわかった。
4. 高齢者の反応遅れ時間を考慮した解析において、すべての場合において、高齢者が含まれているケースの方が衝突確率は高い値を示した。これはブレーキを踏み始める時間が遅れたことにより車

両はその分前に進んでしまい衝突回数が増加したことが原因と考えられる。ブレーキ強さ-8m/s²の場合、その影響は顕著に表れ、約 30%増加した。

参考文献

1. 二瓶美里, 小竹元基, 鎌田実：高齢者の認知特性を考慮した運転能力評価システムの開発, 2011
2. 村上凌一：地震発生時における高速道路上での車群の走行安全性に関する研究, 京都大学修士論文, 2016
3. ドライビングシミュレータを用いた地震発生時の車両挙動解析に関する研究, 京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 交通情報工学研究室, 2016
4. 三宮信夫, 島田亮, 中峯浩：魚群行動における自律分散機構のモデリング. 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.2, pp.211 219, 1993
5. Arne Kesting, Martin Treiber：Calibrating Car-Following Models using Trajectory Data : Methodological Study , March 28, 2008
6. Makishita H, Matsunaga K. : Differences of drivers' reaction times according to age and mental workload, 2007

地区防災計画から波及する多様な展開の可能性

香川大学 四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構
地域強靱化研究センター 磯打 千雅子

Future plan of Community Disaster Management Plan
ISOUCHI Chikako, Kagawa University

For emergency responses, it is necessary to prepare the community continuity response by residents. Residents working on planning CDMP is to be required diversity and continuity of activities. In this study, we elaborate the ripple effect of CDMP planning.

1. はじめに

東日本大震災を経て、広域で甚大な被害が発生した場合の公助の限界が明らかとなり、あらためて共助の重要性が問われ、平成 25 年の災害対策基本法改正において共助に関する規定が多く盛り込まれた。特に地域コミュニティの住民および事業者によるボトムアップ型の自発的な防災活動に関する計画である「地区防災計画制度」が新たに創設され、平成 26 年 4 月から施行されている¹⁾。

ここで注目すべきは、住民参加によるボトムアップ型の仕組みを採用し、災害対策法制の分野で初めて計画提案の仕組みを採用されていることである。住民や事業者は市町村防災会議に対して地区の特性に応じて地区防災計画（Community Disaster Management Plan：CDMP）を定めることを提案できる²⁾。制度の特徴の一つに、活動の継続性が重視される点と、地区の多様性に応じた一般に「計画」と呼ばれる形式化された成果を求める点がある。

この特徴が取り組む主体にどのような効果をうみ出しているのか、本稿では事例とともに考察し、地区防災計画制度の多様な展開の可能性を概観する。

2. 地区防災計画制度の概要

地域と行政が相互に助け合い、連携を前提とした取り組みを日常的に実施することを目的に、平成 25 年の災害対策基本法改正において防災計画体系に地域コミュニティにおける共助の推進を重視した「地区防災計画制度」が新設された。同制度では、地区居住者等（地域の居住者、事業者など）が作成する地区防災計画と市町村役場が作成する地域防災計画が連携することにより共助の取り組みを加速させることを目的としている。

制度の特徴は、以下の通りである。

- ①計画提案制度が採用される等ボトムアップ型の計画
- ②地域に詳しい地区居住者等が作成する「地区の特性に応じた計画」
- ③計画に基づく活動の実践、定期的な評価や見直し、活動の継続等を重視した「継続的に地域防災力を向上させる計画」

地区防災計画は、連携を前提とした制度であり、取り組み主体や計画内容の多様性や作成した計画に対する取り組みの継続性が重視される。

目的は、地区を構成する活動主体との連携活動であり、計画書作成ではない。連携のきっかけとして活動を文書化し、共有することにより、活動プロセスそのものを多様な主体で協働し、策定した計画を維持・運営・改善していくことが重要となる。

3. 地区防災計画の取り組み事例からみる多様な波及効果

本章では、地区防災計画に取り組む地域の事例を概観し、取り組み過程から波及する様々な効果について述べる。

1) タイムライン策定と地区防災計画

本項では、香川県を流下する土器川流域におけるタイムライン策定の取り組みから波及した様々な効果について述べる。

土器川は、香川県唯一の1級河川である。河川の特徴は、河床が急勾配であること、流路延長が短く洪水は短時間で一気に河口まで到達する特性を有していること、さらに流域平野部は地盤高が低いことから、土器川流域一帯は潜在的に堤防決壊による被害拡大の危険性を有している地域である。

当該地域では、2013年より国土交通省四国地方整備局香川河川国道事務所の事業により、流域と氾濫域自治体（丸亀市、坂出市、善通寺市、宇多津町、琴平町、まんのう町）の住民、事業者、行政による大規模水災害に適応した対策検討会が設置され、住民目線と行政目線で検討がなされた。2016年度の事業終了までには、活動の成果として住民目線でのタイムライン策定や自治体向け行動計画書が策定された³⁾。

事業は2016年度で終了し、行政からの支援は途絶えたものの、このことをきっかけにして地域で主体的に地区防災計画へ発展させようという取り組みが始まった。一般に行政主導の弊害は、事業終了とともに半ば義務的参加であった担い手の取り組みも同時に終了することにあるが、本事例では様々な波及効果があった。例に挙げると、初年度の住民主体グループワーク参加者の一人が、本事業がきっかけとなり防災活動の重要性に気づき、自ら防災士を取得した。次年度以降の事業では、若手ながらも防災士としてグループワークのリーダーを務め、現在は地域主体の地区防災計画策定の旗振り役となっているとともに、本取り組みが香川県防災士会におけるリーディングプロジェクトに位置づけられている。

他の参加者では、地域で独自に洪水対策を考える住民主体の協議会を設置。香川河川国道事務所の協力のもと河川事業の現場視察の開催や、町内会単位での洪水避難グループワークを開催している。

また、子ども会と連携したまちあるきを毎年継続しており、着実に防災マップ作成に取り組んだ児童・保護者が増えている。子ども達により作成された防災マップは、地域コミュニティの企画により子ども達自身の手から市長へ報告された（図1参照）⁴⁾。子どもたちは、自分達が住んでいる街がどのようにして作られ、守られ、行政や地域コミュニティは何をしているのか、自らが生まれ育った地域に関心を持ち、将来もし地域外へ転出することがあっても、またコミュニティに帰ってきたい



図1 子ども達が作成した防災マップを丸亀市長へ報告⁴⁾

と思えるような地域への愛着形成へとつながり、結果として地域の価値や持続性を高める取組に発展している。

本事例の波及効果の特徴は、タイムラインの取組の特徴をよく表している。当初、本事業の開始時点では、平時には伏流区間もある土器川に対して、参加者は洪水対策に取り組む意義を見出しにくい状況であった感は否めない。しかし、4年間の事業を通じて参加者によるグループワークやタイムラインの策定、シミュレーション動画の視聴など、事業支援者である建設コンサルタントいであ株式会社の技術者による様々な技術的支援の結果、多くの取組が始動した。

タイムラインの策定には、多様な関係者による協働作業を伴い、とりまとめ役となる事務局の存在が必要で、かつ長期間の活動の継続性が求められるが、このことが逆に多様な組織や専門家の助言を得やすい環境をつくり、取組プロセスにおいて得られる成果は土器川の例に見ても様々な波及効果を発出する。タイムラインは時系列目標を共有し、継続的に多様な担い手が時間をかけて地域防災を目的に取り組める点において地区防災計画制度と親和性が高い。この点においても正の波及効果が発出しやすい特性を有しているといえよう。

2) 小規模多機能自治と地区防災計画

本項では、小規模多機能自治に取り組む地域が地区防災計画策定プロセスにより得られた波及効果について述べる。

小規模多機能自治とは、小規模ながらも様々な機能をもった住民自治の仕組みを指す⁵⁾。その単位は、概ね小学校区程度の区域において目的型組織や地縁型組織等のあらゆる団体が結集し、地域課題を自ら解決し地域運営を行う仕組みである。取組にあたっては、公民館等拠点施設を有する点も特徴である。

岡山県津山市は、「小さな拠点・地域運営組織（住民自治協議会）」をテーマに、地域づくりのステージを第0ステージ（まちづくり・地域づくりの発意）から第4ステージ（地域運営組織の効果的な運用）の5段階に設定した目標指向型の取組を推進している。

本項で紹介する岡山県津山市城西地区は、人口約4,800人で15の町内会で構成される地域である。城西地区では、1996年からまちづくり活動に熱心に取り組んでおり、現在は先に述べた地域づくりステージの中間ステップに位置している。

このようなまちづくりの取組により、城西地区は平成28年度内閣府地区防災計画モデル事業に選定された。津山市を含む岡山県は災害が少なく温暖な気候が特徴で、地域防災に関心が向くような被害やきっかけがない。それでも広範囲な城西地区の中には、吉井川沿いの町内会では河川の洪水に関心があり、比較的低い土地に位置する町内会では大雨時の内水氾濫を気にしていた。

内閣府モデル事業が開始される直前の10月には、津山市北部から程近い倉吉市で最大震度6弱を観測する地震が発生。その際に城西地区でも震度4程度の揺れがあった。当該地では有感地震は稀で、近県で発生したこの地震は城西地区の住民に危機感を与えるのに十分であった。

このような背景から、モデル事業の実施時には月1回の検討会（まちづくり協議会の防犯・防災部会の位置づけ）に毎回100名に達する参加者があり活況を呈した。参加者は、若い消防団員



図2 防災マップづくりに取り組む子どもたち まち歩きに参加

から町内会の役員まで年齢層も様々で女性の参加も多い。モデル事業が年度の3月で終了した後も、月1回の部会活動により活動を継続し、15の町内会単位でのまち歩きの実施と防災マップを作成(図2参照)、11月には地区全体の訓練と研修を行い、いずれも100名を優に超える参加者があった。

城西地区の事例では、従来のまちづくり活動で培われてきたノウハウや人的・関係性リソースが防災目的活動に大いに活用された結果、従来のまちづくり活動にも様々な波及効果が得られた。従来のまちづくり活動は、内容別の部会活動として行っていたため部会間の連携はそれほど見られなかったものの、防災を目的にすえたことによって連携が促進され、かつ、これまでまちづくり活動に参加してこなかった新しい住民も活動に加わるようになった。

防災マップは、津山工業高校生徒による印刷版への図化支援も得られ、マップづくりで浮かび上がった要支援者への課題は福祉部会で見守り名簿づくりといった活動へ発展した。本稿執筆現在でも、支援者や担い手を多く巻き込みながら活動が継続的になされており、今後さらにどのような展開となるか期待をもって注目したい。

4. おわりに

本稿では、地区防災計画が従来の制度と異なる特徴的な点である継続性と多様性が取り組む主体にどのような効果をうみ出しているのか、事例をもって概観した。事例では、当初の活動目的からは思いもよらない波及効果が得られた。加えて、その波及効果は地域の価値をより一層高めるものであり、地区防災計画が求める継続性と多様性をさらに確実なものとしている。

ここに、地区防災計画制度の多様な展開の可能性を見た。

参考文献

1. 守茂昭・西澤雅道・筒井智士・金思顥, “東日本大震災を受けた地区防災計画制度の創設に関する考察～災害対策基本法改正及び内閣府の「共助による支援活動調査」を踏まえて～,” 地域安全学会梗概集 No.34, pp35-pp40, 2014.5.
2. 井上禎男・西澤雅道・筒井智士, “東日本大震災後の「共助」をめぐる法制度設計の意義-改正災害対策基本法と地区防災計画制度を中心として-,” 福岡大学方角論叢第59巻第1号抜刷, 2014.6.
3.) 磯打千雅子: 土器川流域における気候変動に適応した強靱な社会づくりDCP(地域継続計画)策定プロセスにみる多様な地区防災計画展開の可能性—地域継続計画DCPと地区防災計画の関係に着目して—, 地区防災計画学会誌第5号, pp17-29, 2016.
4. 城北コミュニティ「明倫の里 城北」ホームページより, <http://johoku-c.her.jp/> (2017.2.17 閲覧)
5. 内閣府: 小さな拠点情報サイト, http://www.cao.go.jp/regional_management/ (2017.2.17 閲覧) 朝日新聞: 福祉避難所「受け入れ可能」4分の1のみ熊本地震, 2016年7月1日記事, URL: <http://www.asahi.com/articles/ASJ6Y4TBVJ6YTIPE022.html> (2017/4/19 閲覧)

内陸地殻内地震による強震動のエネルギー入力について 岐阜大学工学部社会基盤工学科 能島暢呂・山本大喜

Energy Input of Strong Ground Motion Generated by Inland Crustal Earthquakes

Nobuoto Nojima and Taiki Yamamoto
Department of Civil Engineering, Gifu University

要旨

強震動が構造物応答にもたらす動的効果を明らかにすることを目的として、線形 1 自由度系へのエネルギー入力に着目し、累積エネルギー入力およびエネルギー入力率に基づく評価方法を提案した。4 つの内陸地殻内地震による 5 観測波形を用いて、地震によるエネルギー入力に応答の時刻歴に与える影響や、地震動要素としてのパルス波形の作用、エネルギー入力の集中度合いなどについて考察を行った。

1. はじめに

応答スペクトルは、入力地震動に対する線形 1 自由度系の最大応答値を周期ごとにスペクトル表示したものである。地震動の振幅特性と周期特性を同時に表現できることから、工学的に非常に重要な指標となっている。しかしながら、時刻歴応答における最大応答値のみに注目したものであるため、入力加速度と構造物応答の時刻歴上の関係性については考察の対象とされることは少ない。

一方、近年の強震観測網の発達により、内陸地殻内地震の震源断層近傍でパルス状の波形が観測され、構造物に大きな影響を及ぼすことが知られるようになった。地震動が構造物応答にもたらす動的効果を詳細に考察するには、構造物に作用する慣性力としての振幅・方向・タイミングおよび応答との相互関係を考慮する必要がある。こうした背景のもとで本研究では、振動系のエネルギーの釣り合い式^{1),2)}から導かれる累積エネルギー入力^{1),2)} およびエネルギー入力率³⁾に基づいて、強震動によるエネルギー入力に関する考察を行うものである。

2. エネルギー入力率と累積エネルギーによる評価

線形 1 自由度系の振動の運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{Z}_0 \quad (1)$$

ここに、 m ：質点の質量、 c ：減衰係数、 k ：剛性、 y ：質点の相対変位、 $\ddot{Z}_0$ ：地動加速度である。式 (1) の両辺に微小時間 dt における変位増分 $dy = \dot{y}d\tau$ を乗じて時刻 0 から t まで積分し、 m で除すると、単位質量あたりのエネルギーの釣り合い式^{1),2)} が得られる。

$$\int_0^t \ddot{y}\dot{y}d\tau + 2h\omega_0 \int_0^t \dot{y}^2d\tau + \omega_0^2 \int_0^t y\dot{y}d\tau = - \int_0^t \ddot{Z}_0\dot{y}d\tau \quad (2)$$

表 1: 検討した 5 地震記録

地震名	発生日時	M (M _J)	観測点	同コード	成分
1995 年兵庫県南部地震	1995 年 1 月 17 日	7.3	JMA 神戸		NS
2016 年熊本地震 (本震)	2016 年 4 月 16 日	7.3	KiK-net 益城	KMMH16	EW
			K-NET 一の宮	KMM004	EW
2004 年新潟県中越地震	2004 年 10 月 23 日	6.8	K-NET 小千谷	NIG019	EW
2007 年新潟県中越沖地震	2007 年 7 月 16 日	6.8	K-NET 柏崎	NIG018	EW

ここに, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$: 固有円振動数, $h = c/2\sqrt{mk}$: 減衰定数である. 式 (2) の右辺は, 地震動が時間 t までに構造物に対して行う単位質量あたりの仕事 (累積エネルギー入力) ^{2),3),4)} を表す. また, その時間微分はエネルギー入力率 (仕事率) を表す ³⁾.

$$E(T, t) = - \int_0^t \ddot{z}_0(\tau) \dot{y}(\tau) d\tau \quad (3)$$

$$e(T, t) = \dot{E}(T, t) = -\ddot{z}_0(\tau) \dot{y}(\tau) \quad (4)$$

式 (4) の時刻歴を, あらゆる固有周期 T に対してプロットしたものが「エネルギー入力率 (EIR: energy input rate) スペクトル」である ³⁾. また, 総エネルギー入力率の速度換算値は「エネルギースペクトル」^{1),2)} と呼ばれる. その概念を拡張して, 地震による加振中の状態を表す式 (3) に適用して次式で求められるのが「累積エネルギースペクトル (速度換算値)」である.

$$V_E(T, t) = \sqrt{2E(T, t)} \quad (5)$$

以上の評価指標を用いて, 本研究では, 下記の 4 つの内陸地殻内地震で観測された 5 観測記録を対象 (表 1) とした事例を示す. 減衰定数は $h=5\%$ とする. 図 1 に加速度波形と速度応答スペクトルを示す.

各観測記録における卓越周期に関する結果を図 2 ~ 図 6 に示す. なお, 最大速度応答を与える時刻付近の動的挙動を詳しく見るため, 加速度波形のピーク付近の 10 秒間を抽出して表示する.

(1) JMA 神戸 (図 2, $T=0.87s$)

図 2 に兵庫県南部地震の JMA 神戸 NS 波, $T=0.87s$, $h=0.05$ の例を示す. 時刻 $t=8.6s$ の速度応答の局所的ピーク時に逆方向の最大加速度 (順方向の最大慣性力) が作用することで, エネルギー入力率 e は急激に最大値に達している. これを挟んだ $t=7.5 \sim 9s$ の間は, e がほぼ正値を保ち累積エネルギー入力 E が急増している. 時刻 $t=9 \sim 10s$ においては, e は負値が支配的で E は平均的に減少しており, この間, 慣性力による「負の仕事」によって速度応答は抑制されている. 時刻 $t=10 \sim 12s$ では, 再び e は正値が支配的となり E が増加するが, 上記ほど急激ではない. 最大速度応答が生じた時刻 $t=8.9s$ がエネルギー入力率のピーク直後であり, 地震終了までの総エネルギー入力の半分以上に達していることから, 衝撃的な加速度入力による短時間内の応答を示しているといえる.

このように, 加速度パルスの振幅と符号, および, 速度応答の振幅と符号との複合作用が応答を支配することがわかる.

(2) KiK-net 益城 (図 3, $T=1.05s$)

時刻 $t=20 \sim 22s$ の約 2 秒間では, 負のエネルギーが入力されることがほぼなく, 応答が増幅されている. これに対応して, 2 秒間で急激な累積エネルギー入力の増加が見られる. 時刻 $t=22s$ 以降は部分的に負のエネルギーが入力され応答が減衰している. 累積エネルギー入力の変化は上記の 2 秒間と比較すると緩やかである.

(3) K-NET 一の宮 (図 4, $T=3.16\text{s}$)

時刻 $t=24 \sim 26\text{s}$ の約 2 秒間では、短周期の加速度と速度応答との周期が一致せず、エネルギー入力为正負で相殺している。時刻 $t=26\text{s}$ 以降は、加速度が長周期化して固有周期と一致して共振現象が見られる。加速度と速度応答が逆符号で周期がほぼ一致し、ほぼ正のエネルギー入力で占められている。固有周期が $T=3.16\text{s}$ と長周期であり、累積エネルギー入力は緩やかに増加する。

(4) K-NET 小千谷 (図 5, $T=0.69\text{s}$)

主要動の大部分で加速度と速度応答が逆符号で周期が一致しており、ほぼ正のエネルギー入力となっている。さらに、加速度の振幅レベルが極めて高いため、エネルギー入力も大きい。特に、時刻 $t=20.5 \sim 24\text{s}$ における波数は 5 波にも及んでおり、共振現象と見ることができる。

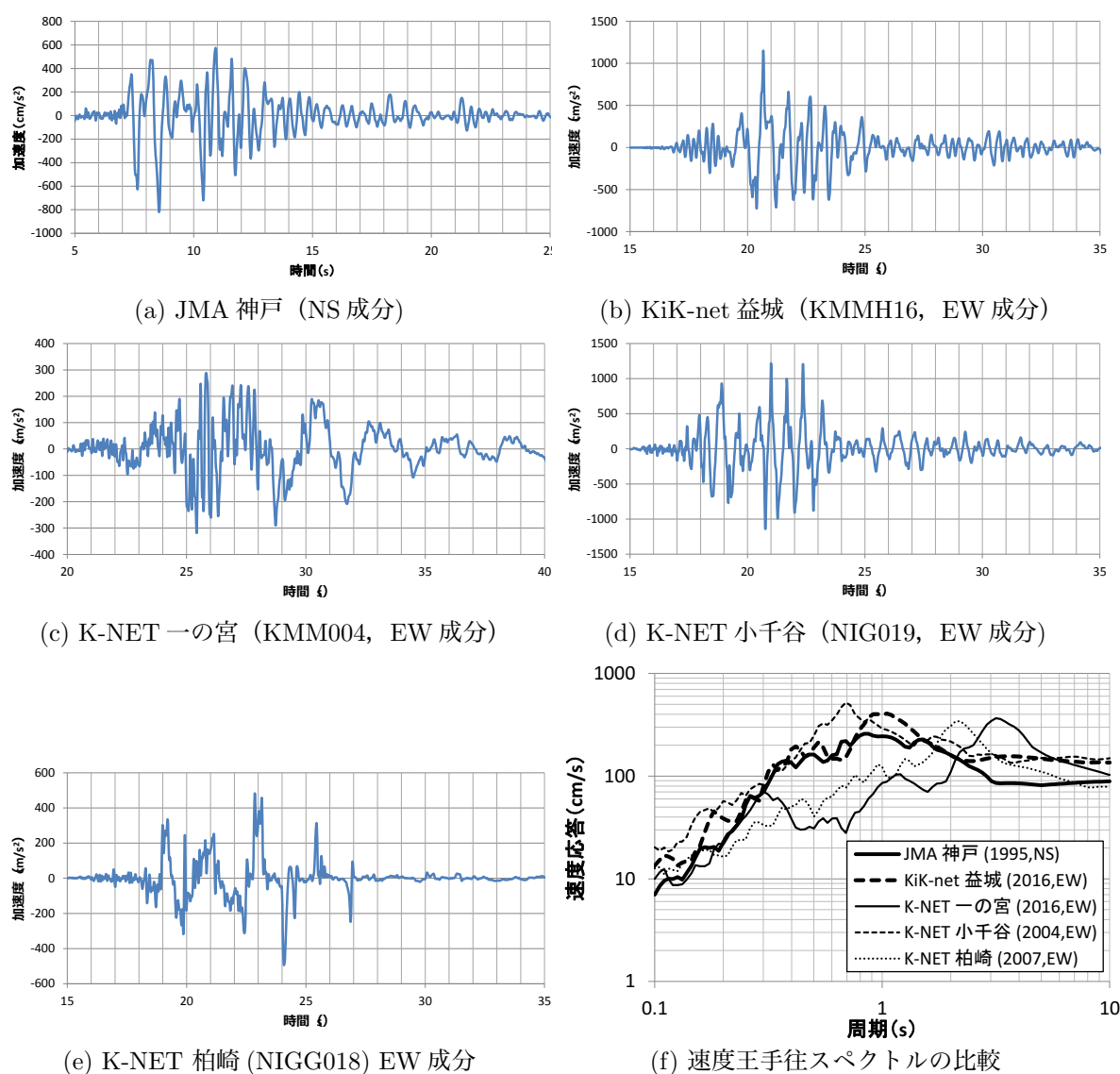


図 1 対象とした加速度波形とその速度応答スペクトルの比較 ($h=0.05$)

(5) K-NET 柏崎 (図 6, $T=2.19\text{s}$)

スパイク状の孤立的な加速度パルスがほぼ 1 秒間隔かつ正負交番で複数作用し、そのタイミングが速度応答の局所的ピークと一致している。局所的ピーク時にエネルギー入力急激な増加が見られ、累積エネルギー入力は階段状に増加している。

以上の 5 観測記録の累積エネルギー入力を図 7 に比較して示す。10 秒間の最大値で正規化した図 7(b) の累積エネルギーの勾配で比較を行う。JMA 神戸と KiK-net 益城ではほぼ同程度で最も急勾配であり、かなり衝撃的な入力であったことが伺える。累積エネルギー入力の最も大きい K-NET 小千谷については、勾配はやや大きいものの、JMA 神戸や KiK-net 益城ほどではない。これらに対して、K-NET 一の宮および K-NET 柏崎については、かなり緩勾配となっている。このように、累積エネルギー入力の時系列を比較することにより、地震動が構造物に及ぼした動的效果の特性を読み取ることが可能である。

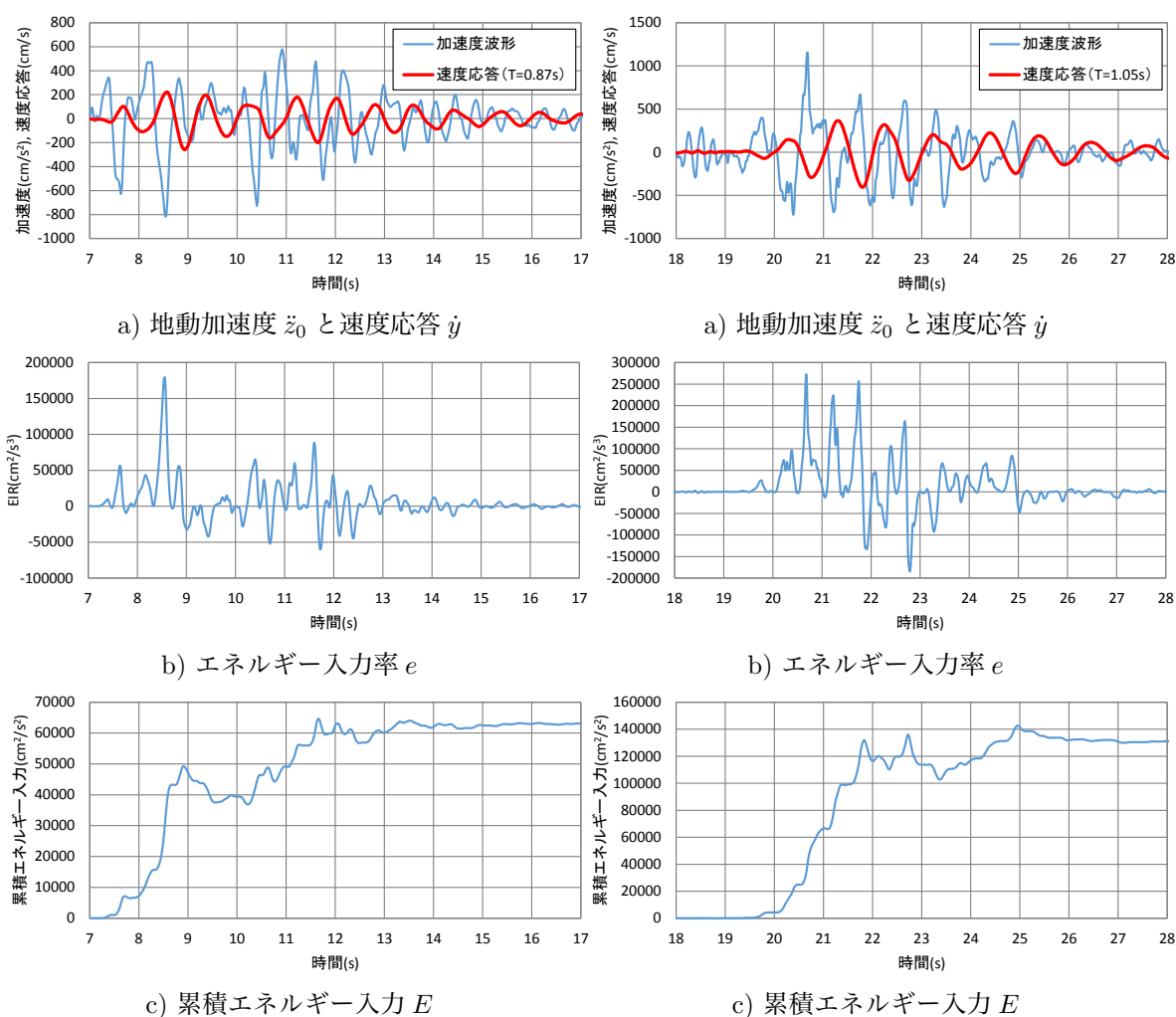


図 2 エネルギー入力に関する結果
(JMA 神戸, NS 成分, $T=0.87\text{s}$, $h=0.05$)

図 3 エネルギー入力に関する結果
(KiK-net 益城, EW 成分, $T=1.05\text{s}$, $h=0.05$)

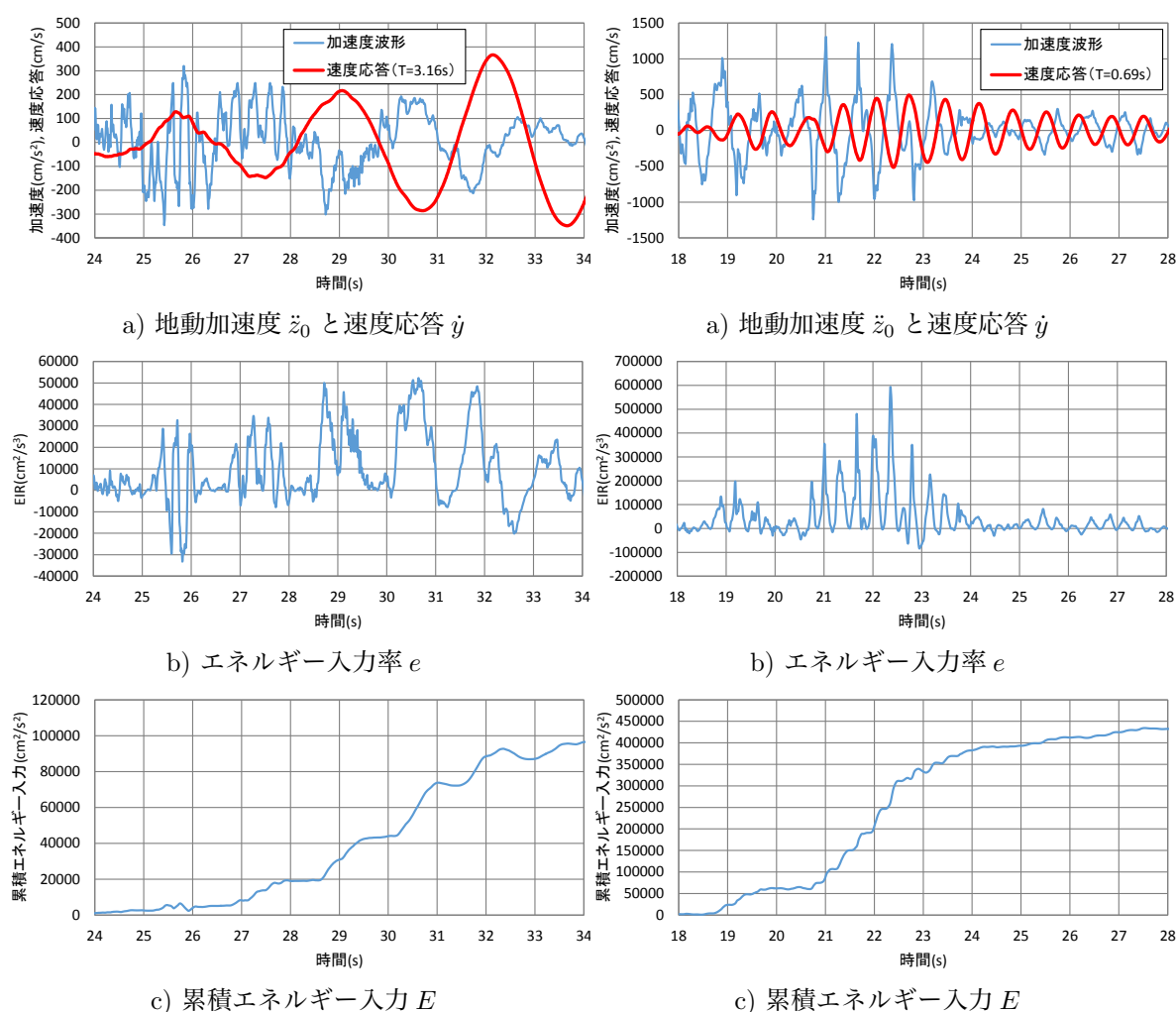


図4 エネルギー入力に関する結果
(K-NET 一の宮 (EW 成分, $T=3.16s$, $h=0.05$))

図5 エネルギー入力に関する結果
(K-NET 小千谷 (EW 成分, $T=0.069s$, $h=0.05$))

3. 入力エネルギーの集中度合いに関する評価

地震動がもたらす動的効果（衝撃的作用もしくは共振的作用）に関して，より定量的に考察を行うため，エネルギー入力に関する経時特性に基づいてエネルギーの集中度合いを定量化し，地震動の動的効果について考察する．まず，入力加速度 $\ddot{z}_0(\tau)$ の累積パワーは次式で表される．

$$P_A(t) = \int_0^t \ddot{z}_0^2(\tau) d\tau \quad (6)$$

これを用いて，正規化累積パワー⁵⁾（“Husid plot” と呼ばれる）は次式で表される．

$$H_A(t) = 100 \frac{P_A(t)}{P_A(t_{\text{end}})} \quad (7)$$

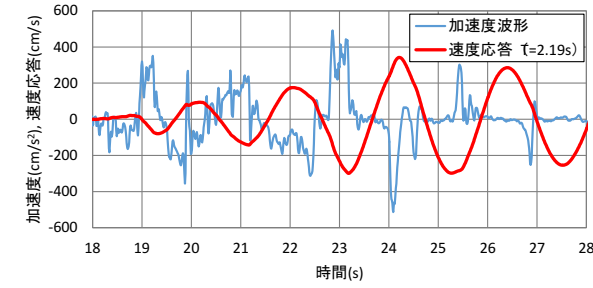
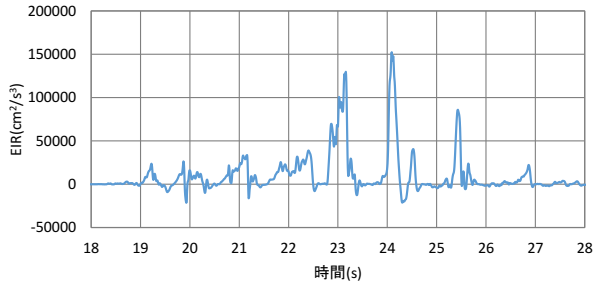
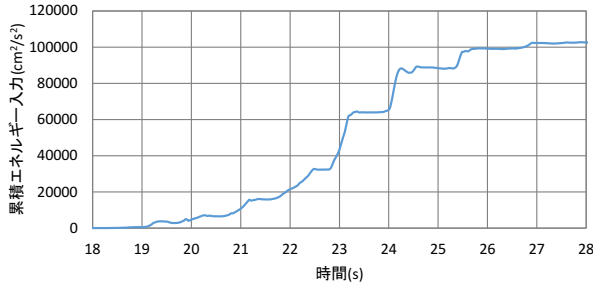
(a) 地動加速度 $\ddot{z}_0$ と速度応答 $\dot{y}$ (b) エネルギー入力率 e (c) 累積エネルギー入力 E

図6 エネルギー入力に関する結果

(K-NET 柏崎, EW 成) $T=2.19s$, $h=0.05$

ここに t_{end} 全記録時間である。正規化累積パワーを 1% 刻みで離散化し、99 個のパーセンタイル値を求める。

$$t_i = H_A^{-1}(i) \quad (i = 1 \dots 99) \quad (8)$$

これを用いて、正規化累積パワー $a\% \sim b\%$ に相当する継続時間 (significant duration) は次式で求められる。

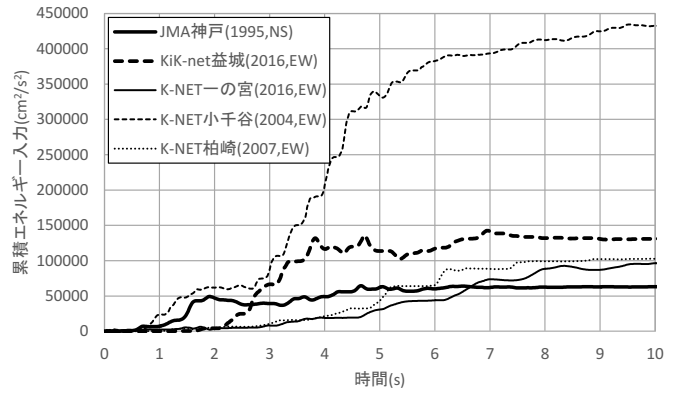
$$D_{a-b}[H_A] = t_b - t_a = H_A^{-1}(b) - H_A^{-1}(a) \quad (9)$$

図8に正規化累積パワーの概念図を示す。

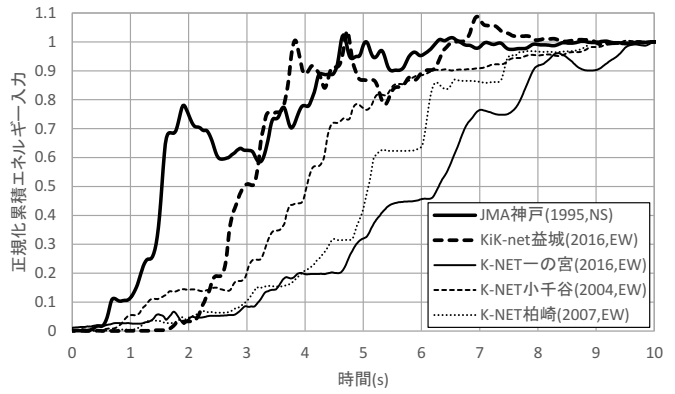
一方、エネルギー入力率は負値にもなり得ることから、図9に示すように累積エネルギー入力は単調増加関数とはならない。従って、その逆関数は多価関数となり、パーセンタイル値が一意に定まらない。そこで、エネルギー入力率を符号に応じて分離し、正值と負値の累積エネルギー入力を別々に評価する。

$$P_{E+}(T, t) = \int_0^t \max\{-\ddot{z}_0(\tau)\dot{y}(\tau), 0\} d\tau \quad (10)$$

$$P_{E-}(T, t) = - \int_0^t \min\{-\ddot{z}_0(\tau)\dot{y}(\tau), 0\} d\tau \quad (11)$$



(a) 10 秒間における実データ



(b) 10 秒間の最大値で正規化

図7 累積エネルギー入力の比較

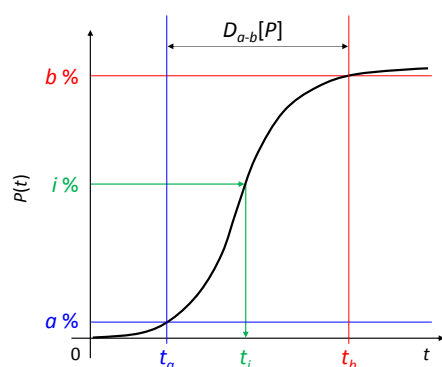
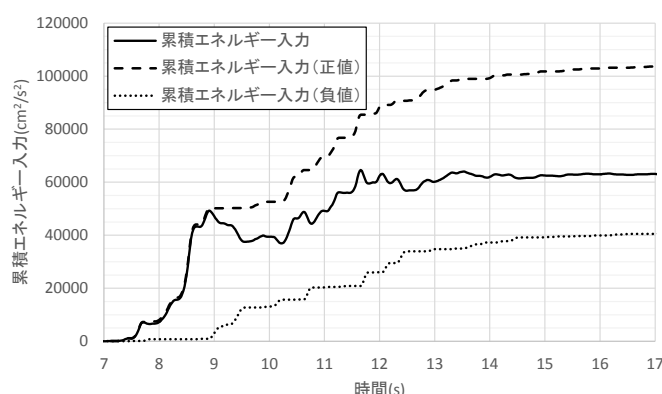


図 8 正規化累積パワーの概念図

図 9 EIR の正負に応じた累積エネルギー入力の分離
(JMA 神戸 (NS 成分, $T=0.87s$, $h=0.05$))

正值と負値の累積エネルギー入力は、それぞれ図 9 に示すように単調非減少関数となる。このうち正值の累積エネルギー入力のみに着目して、式 (7) と同様に正規化し、さらに式 (9) と同様に $a\% \sim b\%$ に相当する継続時間を算出する。

$$H_{E+}(T, t) = \frac{P_{E+}(T, t)}{P_{E+}(T, t_{\text{end}})} \quad (12)$$

$$D_{a-b}[H_{E+}(T)] = H_{E+}^{-1}(b) - H_{E+}^{-1}(a) \quad (13)$$

本研究では、これらの継続時間をエネルギー集中度合いの指標の一つとして検討する。

さらに、正規化累積パワーの継続時間の正規化累積エネルギー入力の継続時間に対する比を用いて、「エネルギー集中係数 C_E 」を次式で定義する。

$$C_{E \ a-b}(T) = \frac{D_{a-b}[H_A]}{D_{a-b}[H_{E+}(T)]} = \frac{H_A^{-1}(b) - H_A^{-1}(a)}{H_{E+}^{-1}(b) - H_{E+}^{-1}(a)} \quad (14)$$

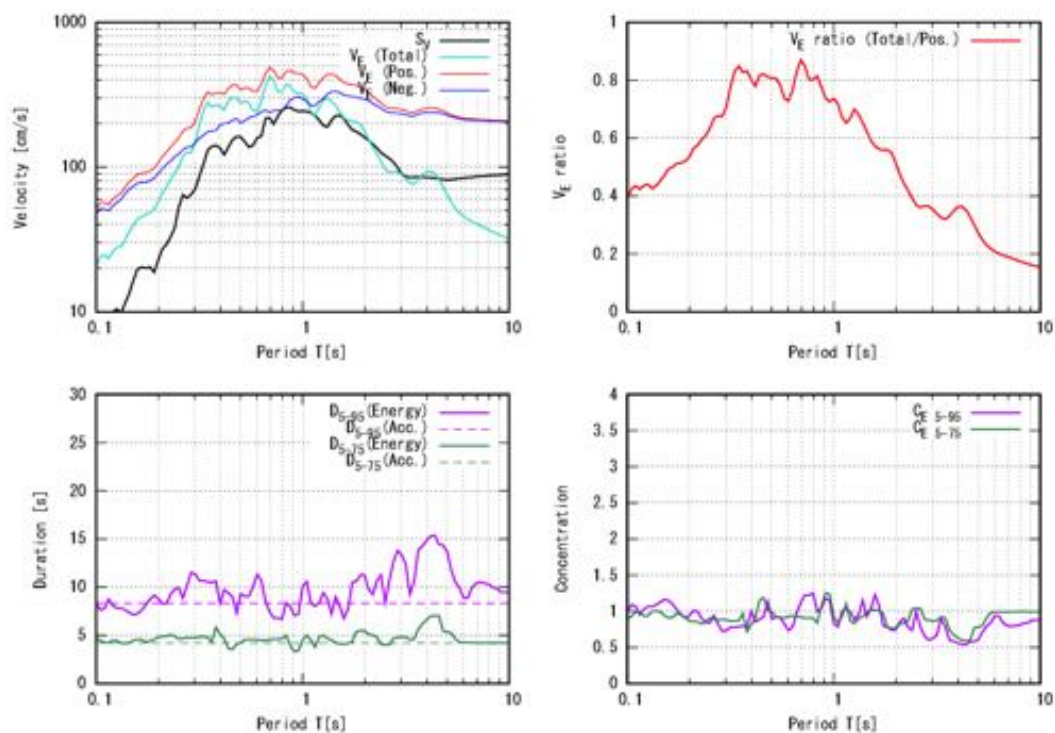
累積エネルギー入力の継続時間が相対的に短いほど大きな値をとり、エネルギーが短時間に集中していることを表す。本研究では、パルスが構造物に与える動的作用が衝撃的か、共振的かを判別するための定量的指標の候補として、エネルギー集中係数について検討する。

また、最終時刻での正の累積エネルギー入力に対するトータルの累積エネルギー入力に占める割合を、「エネルギー入力効率 R_E 」として定義し、所定の継続時間を通じて、エネルギー入力が応答の増幅に寄与した割合を定量化する。

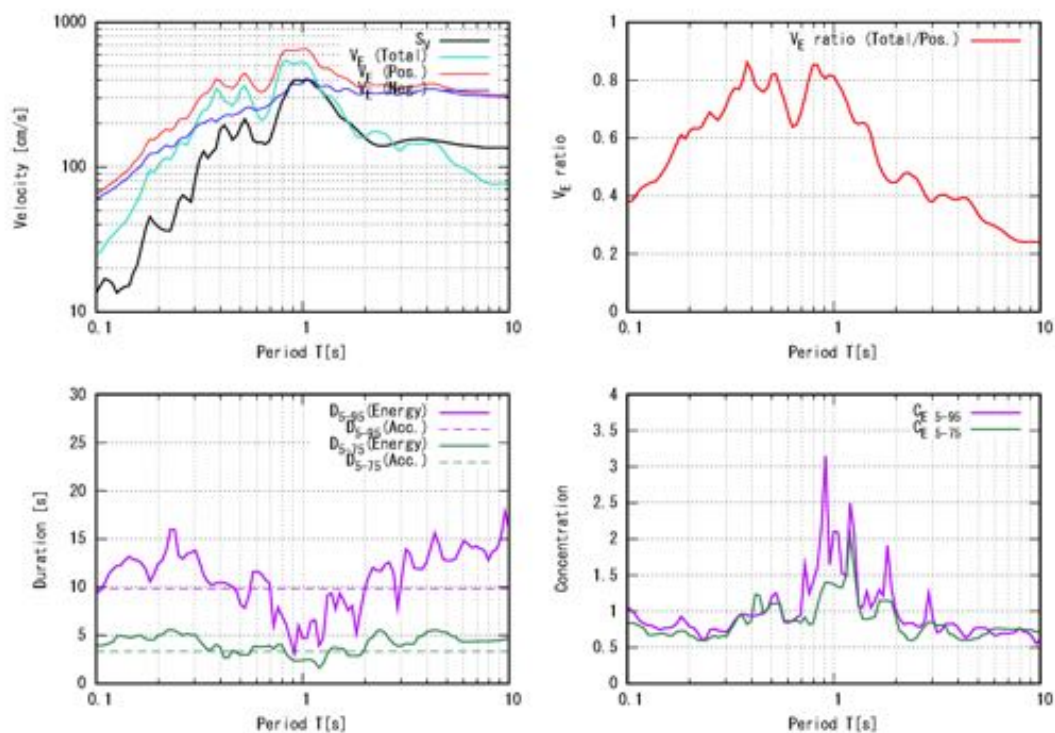
$$R_E(T) = \frac{P_{E+}(T, t_{\text{end}}) - P_{E-}(T, t_{\text{end}})}{P_{E+}(T, t_{\text{end}})} \quad (15)$$

2. と同じ 5 観測記録を対象とした結果を図 10 ～図 14 に示す。各図においては、左上 (a)、右上 (b)、左下 (c)、右下 (d) の順に配置しており、各図が示す内容は以下のとおりである。

- (a) 速度応答スペクトル、および、トータル・正・負のエネルギースペクトル。
 - (b) エネルギー入力効率。
 - (c) 正規化累積パワーおよび正の正規化累積エネルギー入力の 5～95% および 5～75% 継続時間 (実線：正の正規化累積エネルギー入力、破線：加速度の正規化累積パワー)。
 - (d) 5～95% および 5～75% 継続時間に関するエネルギー集中係数。
- なお、本研究では最終時刻を $t_{\min} = 60s$ に統一した。



左上:(a) 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル, 右上:(b) エネルギー入力効率
 左下:(c) 継続時間, 右下:(d) エネルギー集中係数
 図 10 JMA 神戸 (NS 成分, $T=0.87s$, $h=0.05$)



左上:(a) 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル, 右上:(b) エネルギー入力効率
 左下:(c) 継続時間, 右下:(d) エネルギー集中係数
 図 11 KiK-net 益紀 (KMMH16, EW 成分, $h=0.05$)

(1) JMA 神戸 (図 10)

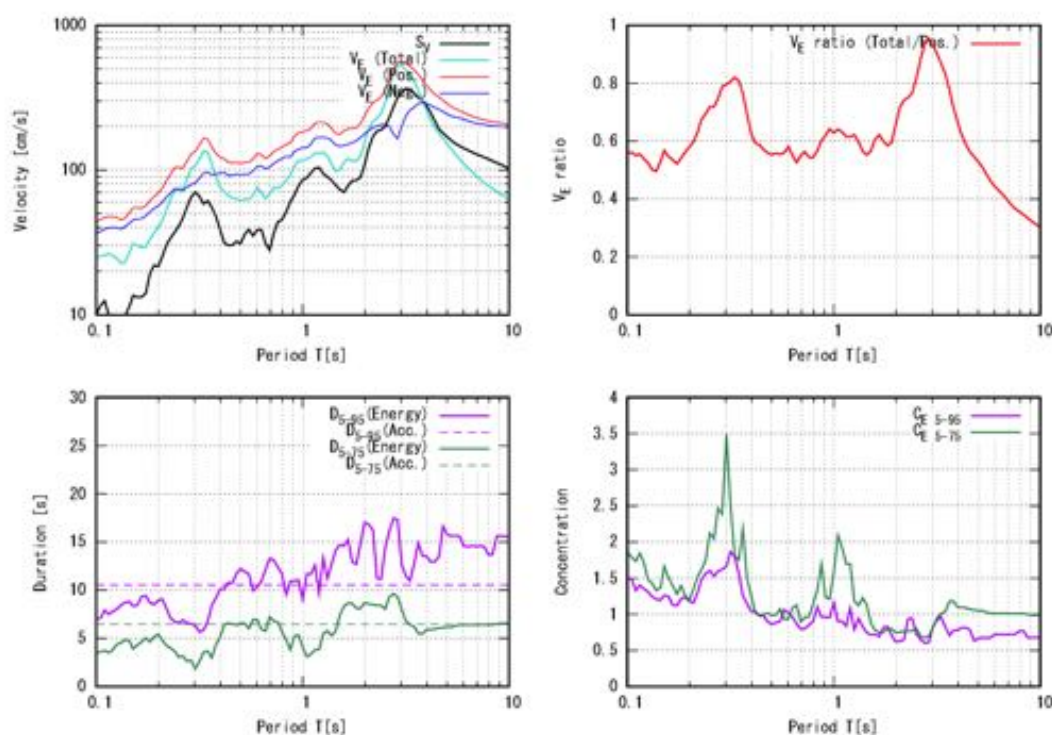
速度応答スペクトルとエネルギースペクトルはほぼ相似形となっている。卓越周期の $T=0.9s$ 付近ではエネルギー入力効率は 80% 近い値を示す。継続時間はエネルギー入力と加速度パワーで大きな差は見られず、 D_{5-95} で 8s 程度、 D_{5-75} で 4s 程度である。卓越周期の $T=0.8s$ 付近では衝撃的效果が予想されたが、全周期帯でエネルギー集中係数 C_E は 1 前後である。継続時間は短時間であるものの、衝撃的效果を表現できているとはいいがたい。この点で、式 (10) ~ (13) による継続時間の評価方法および式 (14) によるエネルギー集中係数の評価方法には、改善する余地があるといえる。

(2) KiK-net 益城 (図 11)

速度応答スペクトルの卓越周期 $T=1.0s$ 付近および $T=0.4s$ 付近では、エネルギー入力効率が 80% を超えている。卓越周期付近のエネルギー入力の継続時間は、加速度パワーの継続時間それを大きく下回り、 $D_{5-95}=4s$ 程度、 $D_{5-75}=2s$ 程度である。 $T=0.4\sim 2s$ の範囲の大部分ではエネルギー集中係数 C_E が 1 を超える。特に $T=1s$ 前後の中周期帯では C_E が非常に高く、 $T=0.9s$ では C_{E5-95} は 3 を超える非常に高い値を示している。これはパルス波による衝撃的效果が顕著に表れている。

(3) K-NET 一の宮 (図 12)

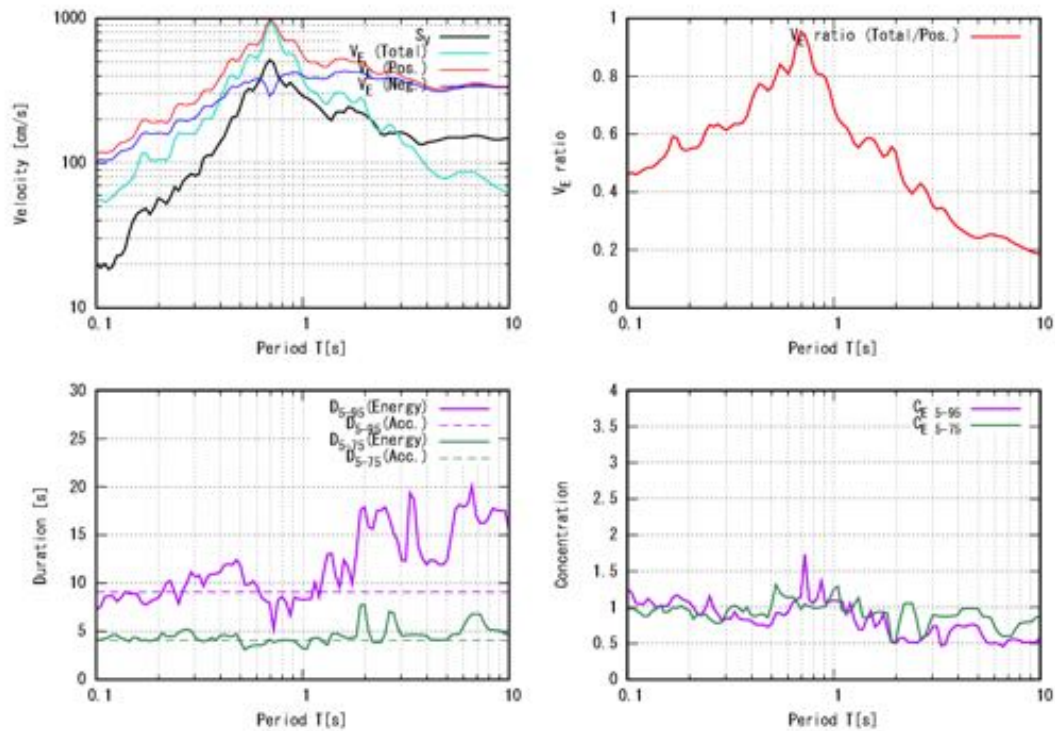
速度応答スペクトルの卓越周期 $T=3.2s$ 付近および短周期側の $T=0.3s$ 付近では、エネルギー入力効率が 80% を超えている。それぞれ加速度波形の後半部分の長周期成分と、前半部分の小刻みなパルスが、逆符号で速度応答と調和的に振動したためと考えられる。 $T=0.3s$ 付近のエネルギー入力の継続時間は



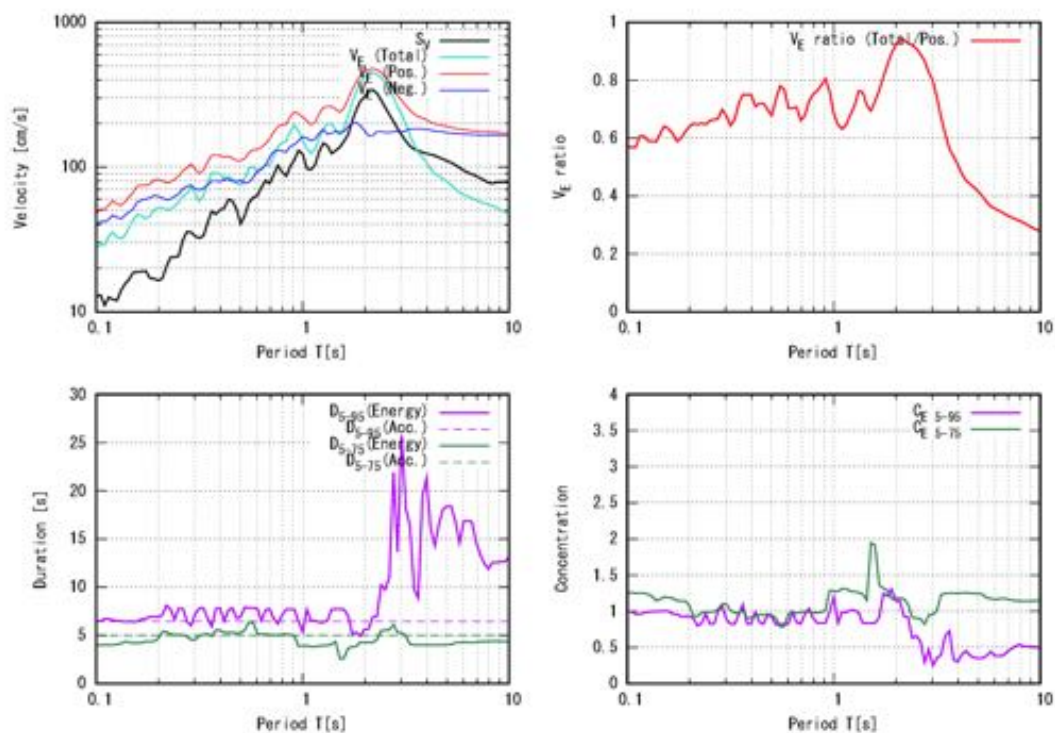
左上:(a) 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル, 右上:(b) エネルギー入力効率

左下:(c) 継続時間, 右下:(d) エネルギー集中係数

図 12 K-NET 一の宮 (KMM001, EW 成分, $h=0.05$)



左上:(a) 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル, 右上:(b) エネルギー入力効率
 左下:(c) 継続時間, 右下:(d) エネルギー集中係数
 図 13 K-NET 小千谷 (NIG019, EW 成分, $h=0.05$)



左上:(a) 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル, 右上:(b) エネルギー入力効率
 左下:(c) 継続時間, 右下:(d) エネルギー集中係数
 図 14 K-NET 柏崎 (NIG018, EW 成分, $h=0.05$)

$D_{5-95}=6\text{s}$ 程度, $D_{5-75}=2\text{s}$ 程度と, 加速度パワーのそれを大きく下回り, エネルギー集中係数 C_E がともに高いことから, 短周期については衝撃的效果があったと推察される. 一方, 長周期側ではエネルギー集中係数 C_E が 1 を下回っており, 共振的效果による応答増幅があったと推察される.

(4) K-NET 小千谷 (図 13)

速度応答スペクトルの卓越周期 $T=0.7\text{s}$ 付近で負のエネルギースペクトルが大きく落ち込み, エネルギー入力効率は極めて高く 90%を超えている. 全周期帯でみると, エネルギー入力の継続時間は, 加速度パワーの継続時間とほぼ同等程度かやや長い. 卓越周期付近のみ $D_{5-95}=5\text{s}$ 程度と短く, このためエネルギー集中係数 $C_{E5-95}=1.7$ 程度とやや大きいものの, $D_{5-75}=4\text{s}$ 程度で $C_{E5-75}=1$ 程度となっている. これらの結果を踏まえると, 卓越周期 $T=0.7\text{s}$ 付近においては, 衝撃的效果というよりも共振的效果の方が優勢であったと考えられる.

(5) K-NET 柏崎 (図 14)

速度応答スペクトルの卓越周期 $T=2.2\text{s}$ ではエネルギー入力効率が 90%を超えている. スパイク状のパルス入力と速度応答が逆符号で, かつ周期が一致する状態が続いたためである. 継続時間については, 長周期における D_{5-95} が非常に長く, 卓越周期付近では累積パワーの継続時間の 3 倍以上の長さになっており, エネルギー集中係数 C_E は 0.5 を下回る. 累積エネルギー入力が徐々に増加し, 共振的な作用をもたらしたといえる. C_{E5-75} の方が大きな値を示す傾向にあり, 75 ~ 95%までの累積エネルギー入力の増加が緩やかであったことを反映している.

4. 結語

本研究では, 強震動が構造物応答にもたらす動的效果を明らかにすることを目的として, 線形 1 自由度系へのエネルギー入力に着目し, 累積エネルギー入力およびエネルギー入力率に基づく考察を行った. 速度応答と加速度入力の積により定義される単位質量あたりのエネルギー入力が, 応答の時刻歴に与える影響について考察を行うとともに, 地震動要素としてのパルス波形がもたらす作用について考察を行った. さらに, エネルギー入力の継続時間と, 加速度の累積パワーに基づく継続時間との比較を通じて, エネルギーの集中度合いについて考察し, エネルギー集中係数でその定量的評価を行った.

本研究では正值のエネルギーに入力のみに着目した累積エネルギーを用いたが, 加速度波形の末端部分までのエネルギー入力を考慮しているため, 局所的で急激なエネルギー入力の効果をやや過小評価する傾向にあると考えられる. 従って, パルスの作用が衝撃的か共振的かを判別するための定量的指標としては, さらに改善が必要と考えられ, 今後の検討課題としたい.

謝辞本研究では, 国立研究開発法人 防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net による強震記録を使用させていただいた. 記して謝意を表する次第である.

参考文献

1. 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 228p., 1999.11.
2. 加藤勉, 秋山宏: 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第 235 号, pp.9-18, 1975.9.
3. 大井謙一, 高梨晃一, 本間靖章: 地震動のエネルギー入力率スペクトル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 420 号, pp.1-7, 1991.2.
4. 井上範夫, 堀則男, 中村孝也: RC 構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.531-536, 1997.
5. Trifunac, M. D. and Brady, A. G.: A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.65, No.3, pp.581-626, 1975.

地震に起因する人間被害の把握と減災戦略(短報)

高齢者住宅研究所 志垣智子
東濃地震科学研究所 太田 裕
大阪市立大学 宮野道雄

Human Casualties in Earthquakes and Their Reduction Strategies (Short Report)

For Introducing Ichushi Web Database

Tomoko SHIGAKI, Inst. of Elderly Housing Science
Yutaka OHTA, Tono Res. Inst. of Earthquake Sciences
Michio MIYANO, Osaka City University

Summary

We attempted to collect human casualty equations based on published reports in ordinal earthquake engineering journals and made clear that the proposed equations concern either during the ground shaking or the following immediate situation. We should expand our handling over the traditional approach to the medical field assisted by the Japan's Medical Database called "Ichushi". The most peculiar characteristics of retrieved papers between two different DBs are essentially two. One is the covered time length. Papers from the engineering journals concentrate limited time zones of duration of shaking and immediate instance. On the other hand, most papers retrieved from the Ichushi DB deal with quake-originated short and long term diseases as internal medicine, psychic trauma and so on. So we ascertain additional data retrieved from IchushiWeb DB works far decisively.

1. 研究の展開方向

明治初年に始まり 1995 年兵庫県南部地震に至る国内主要地震を対象とした人間被害(死傷者)予測式について、地震(工)学関係誌に掲載の原著論文活用を主眼とする考察を開始した¹⁾。その結果、地震に伴う死傷者の発生について伝統地震(工)学が注力する主領域が時間的には「地震のユレの最中および直後という(超)急性期」にほぼ限定されていることが鮮明となった。しかしながら、地震に伴う人間被害が最中・直後を越えて時間的に長期にわたることに疑いの余地はない。

関連で研究の今後展開方途として 2 つの主題が浮上する。1 つは対象とする地震に 1995 年兵庫県南部地震を加えて、時間軸をさらに近年へと近付けることである。他の 1 つは地震毎の関係時間領域の拡大を計ることである。前者については周知の地震(工)学関係誌を紐解くことで関連 Database(以下、「DB」と記す。)の質的充実を計るのにさほどの困難はない。しかし、地震の発生に起因する急性期以降～慢性期に及ぶ人間疾患群は現有地震(工)学では慣例的に対象範囲外とされており、既往事例の充足は殆ど期待出来ない。このため、探索範囲を医学方面に大きく拡げることで上記の難点を乗り越えなければならない²⁾。本論では、このような理由から伝統地震(工)学を越えた学際領域問題としての扱いに注力する。「医中誌 WebDB」³⁾の活用である。

2. 医中誌 WebDB の導入

1) 医中誌 WebDB

医中誌 WebDB(特定非営利活動法人医学中央雑誌刊行会)は米国 PubMed(National Inst. Health)DB⁴⁾の邦文版として、医学、歯学、看護学、獣医学分野の日本で発行される、学協会誌・研究会誌、業界誌、商業誌、大学・研究所・病院・学術団体などの紀要、研究報告(対象分野で入手できる定期刊行物はすべて)を対象資料としている。「原著論文」「会議録」「座談会」「図説」「講義」「解説」「総説」「一般」「Q & A」「レター」「症例検討会」「コメント」を対象文献として収録している(表1)。地震関連の中～長期にわたる症例研究も相当数あり、さらに集録領域は伝統の地震(工)学系雑誌を大きく越え、論文等の収録件数は現時点で優に1,000万件に達している。

なお、論文等の収録領域はPubMed>医中誌Webであるが、邦文論文等の収録では医中誌Webが最大である。検索ルールはPubMedを継承しており、我々には馴染みやすい。問題は、PubMedがDB名から想定される領域を遥かに越えた広範囲の文献を収録しているのに対して、医中誌WebDBはDB名に忠実というべきか、自然災害起因の人間被害関連DBの収録がPubMedに比して限定的であることにある。本論では、このような問題を持つことを承知の上で医中誌WebDBの検索を主体とし、地震に起因する人間被害の全体(外科系・内科系疾患、さらに精神系疾患)に注目することで、伝統地震(工)学関係誌のみでは見落としがちな疾患系の充足に努めた。

医中誌WebDBによる検索・抽出を行う上で、目的に見合った適切なkeywordsを選定する作業が簡単でない⁵⁾ことから、重要keywordsを「人間(ヒト)」、「地震(各地震名)」とした結果、地震と人間被害関連の文献(77件)に絞り込んだ。地震(工)学関係誌は原著論文を対象としているが、医中誌WebDBでは被害の多様性に注目するため検索・抽出された論文種類別のkeywords群を見比べ内容を吟味し、最終的に原著論文、解説、総説の45本に限定した。対象時期は明治初年に始まり1995年兵庫県南部地震の直前までとする。死者が発生した地震を対象として医中誌WebDB採択による効果の程を浮き彫りにすることに注力した。具体的には、医中誌WebDB上で論文の内容(主題)を表す言葉を各地震名とみなし、地震名を検索語として入力し論文を抽出した。チェックタグを「ヒト」(選択肢:「ヒト」、「動物」)、



図1 本研究の流れ、医中誌での検索画面検索画面

表 1 医中誌 WebDB に収録されている論文の種類と定義⁵⁾

論文の種類	概要
原著論文	独創性、新規性のある研究論文。具体的には、目次や論文の冒頭に「原著」「原著論文」と記載されているもの、「著者名と所属があり、目的・対象・方法・結果・考察・結論」の論文形式になっているもの、「抄録・図・表・写真・参考文献」があるもの、「症例報告」を原著論文としている。
解説	あるテーマについて、その分野の専門家が解説した記事。
総説	あるテーマについて、関連文献に基づいて既知の事項、動向、研究状況、課題などを総括的に論評した論文、または「レビュー」「総説」と明記されている記事。
会議録	学会などで行われる研究発表の要旨、抄録および会報。
Q&A	質疑応答で構成された記事。または「Q&A」「質疑応答」等と明記されている記事。
図説	写真、図、データに何らかの説明が付されている記事。「図説」「アトラス」等と明記されている記事。
座談会	対談形式で構成されている記事。「座談会」「対談」「鼎談」等と明記されている記事。
講義	聴衆や学生を相手に行った講義。「最終講義」「臨床講義」と明記された記事。学会やシンポジウムなどで行われる講演は含まない。
レター	手紙形式の記事。「編集者への手紙」「Letter to the editor」「著者からの返事」「Author's Reply」と明記されている記事。
症例検討会	実際の症例を取り上げて、病歴、診察所見、検査所見に基づいて、診断、治療、予後、患者教育、看護の方法などについて討議する形式で掲載された記事。討議のやりとりが省かれ、討議の結果と考察のみの記事も含む。「症例検討会」「クリニカルカンファレンス」「ケースカンファレンス」「事例検討会」「臨床病理検討会」「CPC」等と明記されている記事。
コメント	ある論文についての批評的または説明的な記事。「コメント」「コメンタリー」「エディトリアルコメント」等と明記されている記事。
一般	他のいずれの論文種類にも該当しないが、内容に価値のある記事。

論文種類は全て(「原著論文」「会議録」「座談会」「図説」「講義」「解説」「総説」「一般」「Q & A」「レター」「症例検討会」「コメント」)該当させた(図 1、表 1)。次に医中誌 WebDB での検索主体は一予測手法設定に至るまでの記述は少なく一語句・文章形式の Keywords 群が殆どであることから一近年発展の Text-Mining の手法活用^{6,7)}によって関係論文群を検索し整理を進めた。

2) 抽出論文

医中誌 WebDB を用いて明治初年に始まり 1995 年兵庫県南部地震の直前までとして死者が発生した 35 地震を対象に各地震名を検索語として入力した。その結果、論文数は計 137 件であったが、実際地震に伴う人間被害の記載があった論文は 77 件であった(図 2)。対象とする地震は 1891 年濃尾地震からはじまり 1994 年三陸はるか沖地震である。北海道南西沖地震の 31 件を除き、各地震の論文数は 10 件以下である。

論文種類別にみると原著論文 44.16%(34 件)、会議録 37.66%(29 件)、解説/特集 14.29%(11 件)、レポート 2.60%(2 件)、レター 1.30%(1 件)であった(図 3)。

本論で対象とする会議録は医中誌全体の論文種別と比較して少ないものの、原著論文は相対的に高く、原著論文と解説、総説を合計した数は全体の 6 割を占める。ここでは地震(工)学関係誌との比較、論文種別の概要、keywords 群を考慮して原著論文と解説/特集を合わせた 45 件を対象とした。対象論文から損傷部位、受傷機転、死因、疾病名、被害にかかる要素(年齢、性別、経過時間等)に係る Keywords 群を抽出した。地震工学関係誌の抽出論文 23 件が対象とする人間被害の発症時期は急性期^{*1}が主で Keywords 群は計 93 語ある。一方、医中誌 WebDB による抽出論文は急性期、亜急性期、慢性期の各時期を連続

^{*1} 本論では、急性期を地震発生最中、直後から 1 週間、亜急性期を地震発生から 2・3 週間⁸⁾とした。災害医学では慢性期を 2、3 年としているが、精神科では地震発生後 1 か月後に症状が出るとの既往研究^{9,10)}から本論では慢性期を 1 ヶ月以降とみなした。

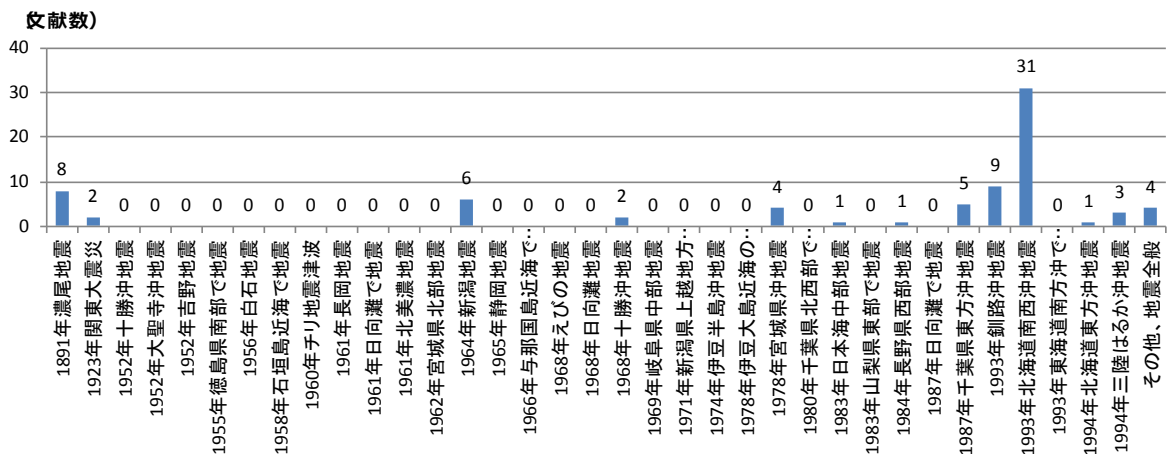


図2 死者が発生した1994年以前の地震別の医中誌 WebDB による抽出論文数

して発症している場合も見られる(図4)。急性期の占める割合は約8割を占める一方で、慢性期を対象とした論文は全体の約4割を占め、また keywords 群は全体の約2割を占める。最も長いもので6年2か月後の心的外傷後ストレス(以下、「PTSD」と記す。)による影響について言及している。

図5は医中誌 WebDB による45件の論文について年を単位とする関連論文数を時系列で描いたものである。1964年新潟地震、1968年十勝沖地震を契機に関連研究が始まり、1993年北海道南西沖地震でさらに多くの研究がなされている。1891年濃尾地震に関する論文が2008年から現在まで研究がなされており、地震後の経過時間にかかわらず医学(看護)分野では研究がなされる傾向が強い。

対象論文の主要雑誌の上位15位を図6に示しておく。周産期医学(対象とする地震：1964年新潟地震、1978年宮城沖地震、1994年三陸はるか沖地震、以下同様。)、日本看護歴史学会誌(1891年濃尾地震)が各5件で上位である。医学、看護学、精神科、歯学と様々な分野が人間被害の多様性を取り扱っている。

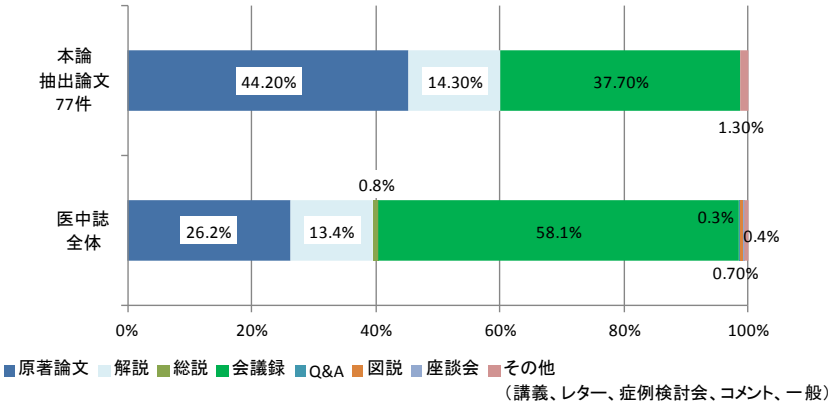


図3 医中誌 WebDB による抽出された論文の種類

急性期	亜急性期	慢性期	文献数	keywords	時期'
			22	167	A
			6	155	B
			7	53	C
			1	2	
			3	8	
			6	29	
計			45	414	

図4 医中誌 WebDB から抽出対象論文(45件)に基づく人間被害の発症時期

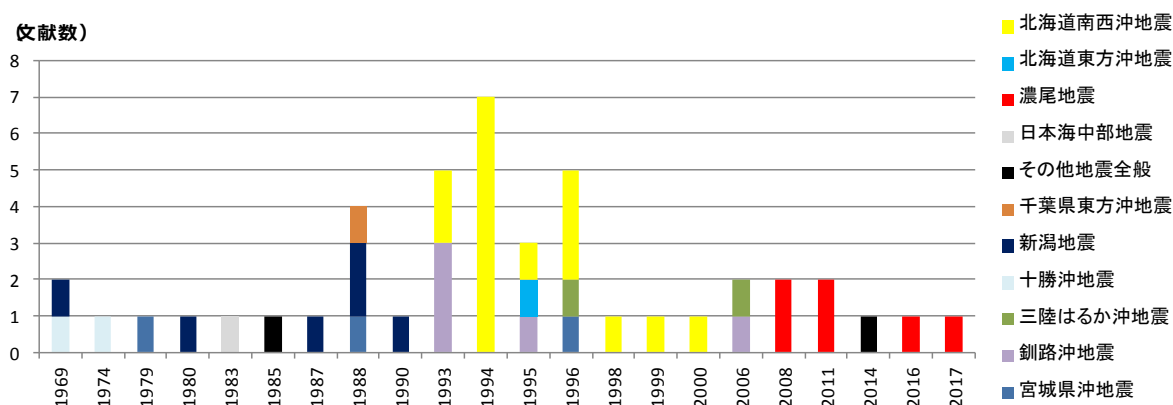


図5 医中誌 WebDB からみる各地震による関連文献数の時系列

3. Keywords 群と度数分布等

地震(工)学系関係誌・医中誌 WebDB から抽出された Keywords は各自が適宜 Keywords 群を与えているため内容的には全く同一の対象が別の言語表示になっている場合、例えば“透析患者”“透析”のように散見される。このため“慢性呼吸器系”“感冒”を“呼吸器系疾患”とするなど小分類を中分類にする作業が発生した。これらは当面、筆者らが手動で改訂を試みた。このような作業を行った後、Keywords 群に対する度数分布を図7から図10に揚げておく。

地震(工)学系関係誌から抽出された Keywords 群は計93語あり、1論文あたり4語程度の Keywords が並ぶ。高頻度 Keywords 群をみると、1位が「死者数」、2位が「負傷者数」、

次いで3位が「震度」、4位「全壊戸数」5位「年齢」、6位「性別」と続く(図7)。著者は河角にはじまり、太田、望月、宮野・呂を反映した結果である。同様に医中誌 WebDB から抽出された急性期のみ(図4の時期' A)を発症時期とする22論文167keywords群の出現頻度をみると、1位「骨折」、2位「打撲」と症状が上位に上がり、次に3位「下敷」、4位「受傷」、5位「重症」、直後、避難行動時の6位「ショック」7位「パニック」が続く(図8)。

急性期～亜急性期(図4の時期' B)を発症時期とする6論文・keywords群155語の出現頻度では、1位「骨折」、2位「精神障害者」、3位「避難行動」、4位「呼吸器系疾患」5位「ストレス」、6位「軽傷」、7位「打撲」となった(図9)。急性期では見られなかった「精神障害者」、「呼吸器系疾患」、「ストレス」が浮上した。地震発生後の経過時間によって症状が変化すると同時に外科系疾患から内科系・精神系疾患へと広がっていることが分かる。

次に、急性期～慢性期(図4の時期' C)を発症時期とする残りの17論文、keywords群92語の出現頻度をみると1位はPTSD、統合失調症、分裂病等の「精神系・精神障害」、2位は地震発生からの時間軸を示す「経過時間」、3位「高齢者」、4位「女性」、5位「義歯紛失」、6位「頭痛」、7位「不安」である(図10)。地震発生後から長期にわたる避難生活上で高齢者や既往症を持つ多様な疾患の増悪につながる

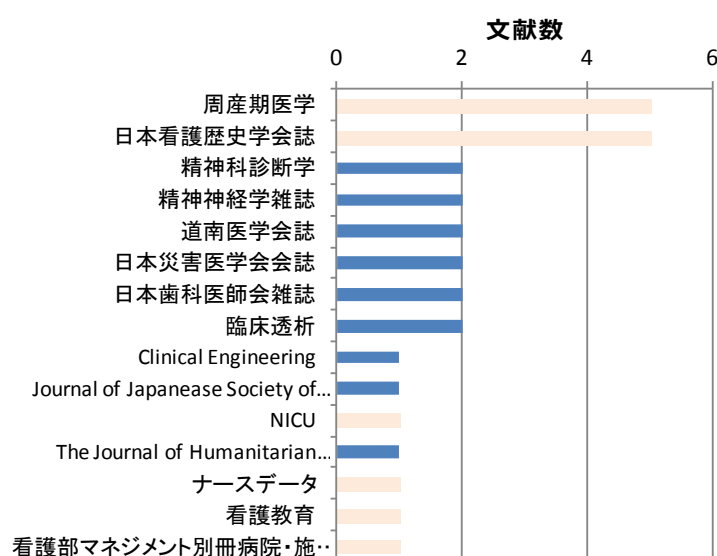


図6 医中誌 WebDB における主要雑誌群

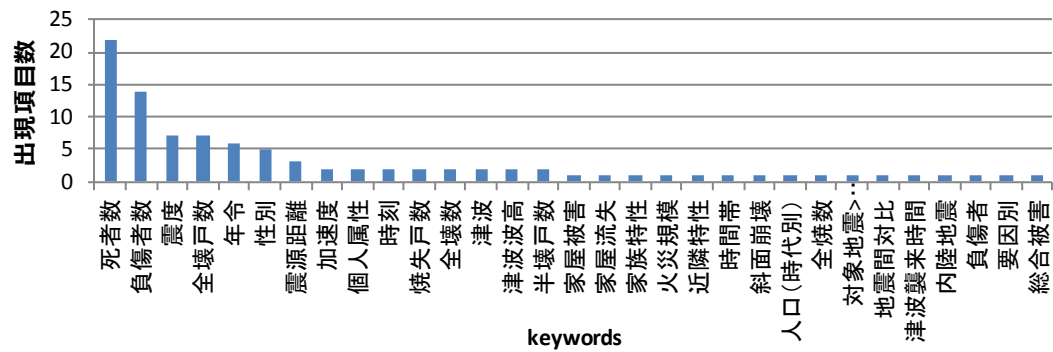


図 7 改訂済地震工学系 Keywords 群 93 語の度数分布（急性期）

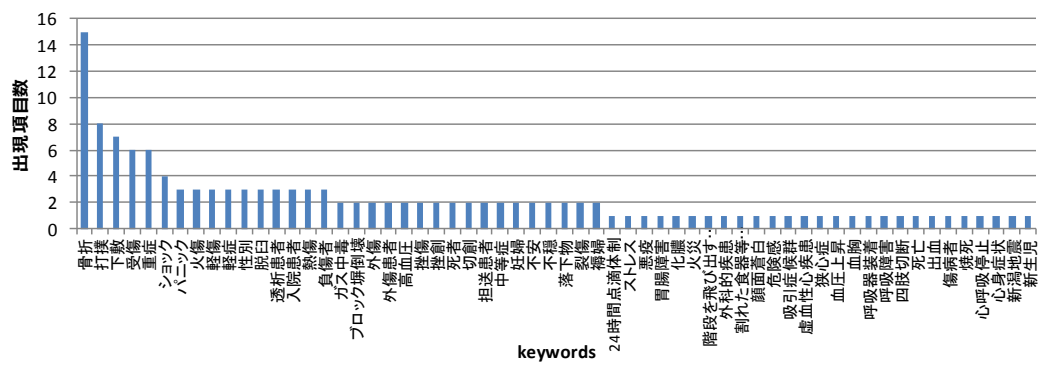


図 8 改訂済医中誌 WebDB Keywords 群 167 語の度数分布（急性期）

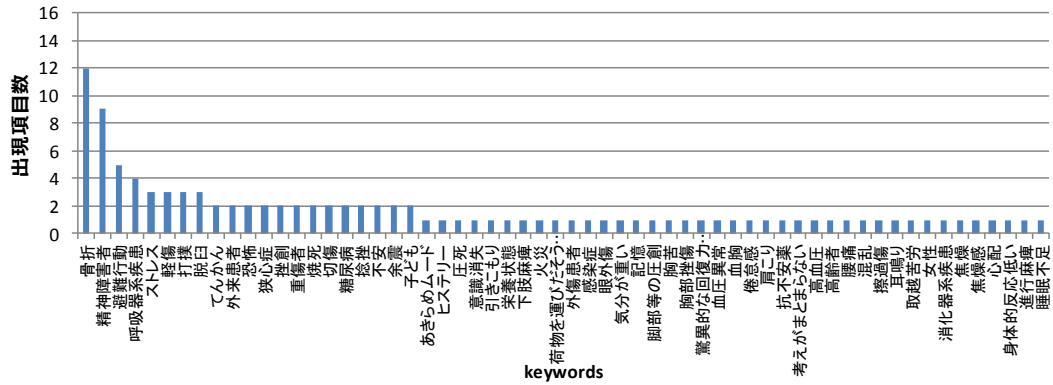


図 9 改訂済医中誌 WebDB Keywords 群 155 語の度数分布（急性期～亜急性期）

具体的な keywords が挙がっている。

3) 両文献 DB の対比結果

両者の最も著しい違いは、地震に起因する疾病の発生種と発生時期・終結期に関する時間長さである。周知の地震(工)学関係誌が殆んどユレの「最中・直後」に注力していることから、予測式が構築し易い面を有する一方で、医中誌より抽出の Keywords 群は長期に亘る内科・精神系疾患群の発生とそれらが被災域住民の生活支障へ及ぼす影響等々、被害の多種・多様性に力点をおいたものとなっている点にある。

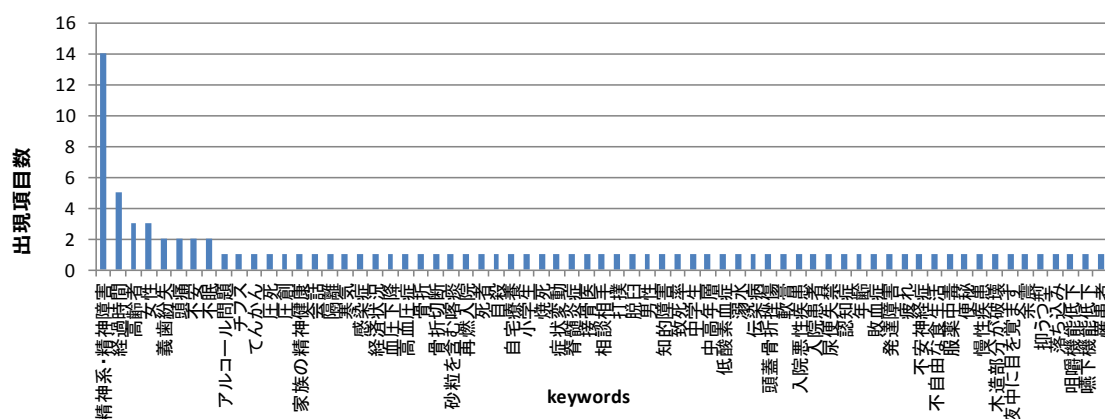


図 10 改訂済医中誌 WebDB Keywords 群 92 語の度数分布（急性期～慢性期）

4. 今後に向けて

以上を一言でいえば、地震(工)学関係者の人間被害に関する対象・処理領域が狭きに過ぎることを医中誌 WebDB が教えてくれていることであり、その今後活用の重要性を端的に示していることに他ならない。

以上の結果は、医中誌 Web・PubMed 等の医学系 DB も今後多用していくことの重要・不可欠性を示唆している。本論は、当面 1995 年神戸の地震以前とし、かつ主に国内(近傍)発生の地震群に限定しているが時間軸を今日に向けて拡大し、併せて日本の地震から世界のそれへと順次拡大すべきであり、今回の成果(そして学習)は必修であった。また、こういった扱いを通じて「地震に伴う人間被害の多様性」理解が実体化されると共に、それら多様な被害が個人の心身支障を越えて社会生活に及ぼす重篤な要因となることがさらに判然としてくるであろう。

参考文献

1. 太田裕, 志垣智子, 宮野道雄: 地震に起因する人間被害の把握と減災戦略(1) 予測実験式と減災戦略の小史ー 1995 年神戸の地震以前ー, 秋季地震学会, 2017.
2. 太田裕: 地震に起因する人間被害の文献学的研究-第 1 報 医学文献 DB による論文の検索と傾向分析-, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No.22, pp271-393, 2008.
3. 医中誌 DB, 医学中央雑誌刊行会.
4. PubMed DB, Nat. Inst. Health, USA.
5. 特定非営利活動法人日本図書館協会: わかりやすい医中誌 Web 検索ガイド-検索事例付-, 2013.
6. 太田裕: 2016 年度開催の研究委員会報告にみる地震防災の研究動向, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No.39, pp103-109, 2017.
7. 太田裕, 資料: 金井先生の Academic Activities を概観する-文献書誌学的視点から-, 東濃地震科学研究所報告, Seq. No.26, pp187-198, 2010.
8. 山本保博、鵜飼卓、杉本勝彦: 災害医学, pp7-8, 南山堂, 2002.
9. 大平常元, 岩館敏晴, 衛藤俊邦他: 地震に対する人間の反応の性差、年代差-宮城県沖地震の場合を中心に-, 精神経誌, Vol.87, No.4, p265, 1985.
10. 山本賢司: 災害時の精神疾患患者への対応, 看護教育, Vol.55, No.10, pp992-998, 2014.

2016 年熊本地震における熊本市消防局の救助・救急活動について —2004 年新潟県中越地震・2005 年福岡県西方沖地震との比較—

山口大学 村上ひとみ

Study on Rescue and Emergency Activities by Kumamoto City Fire
Department after the 2016 Kumamoto Earthquake
- Comparison with the 2004 Niigata Chuetsu and
the 2005 West off Fukuoka Prefecture Earthquakes -

Hitomi Murakami , Yamaguchi University

Abstract

This study examined SAR and emergency response activities by Kumamoto Municipal Fire Department which covers Kumamoto city, Mashiki town and Nishihara village most heavily damaged by the 2016 Kumamoto earthquakes. Responses and records of fire departments in the 2014 Niigata Chuetsu earthquake with continuous aftershocks and high number of sheltering population and those in the 2005 West off Fukuoka Prefecture earthquake are compared. SAR by the fire department was 3.7 cases per 1000 households in Mashiki town, which was 3 times more than in Ojiya region in the 2004 earthquake. Mashiki-Nishihara fire station had various difficulties due to serious damages to bridges, roads and lifelines

1. はじめに

2016 年熊本地震は 4 月 14 日 (木) 午後 9 時 26 分に M 6.5 の地震が発生し、益城町で震度 7 を記録した。気象庁の発表でもこれを本震とみなし警戒中に、4 月 16 日 (土) 午前 1 時 25 分、M7.3 の本震が発生し、益城町、西原村で震度 7 を記録し、甚大な家屋倒壊と人的被害が発生した。

熊本県災害警戒本部のまとめ (2016 年 11 月 22 日現在、第 196 報) によれば、死者は計 145 人 (表 1) にのぼり、熊本県内で全壊が 8334 棟、半壊が 31778 棟と報告されている。

熊本地震では激しい余震活動が続いたことから、避難者が増大し、熊本市では 4 月 17 日に 108,266 人が避難し、市の人口 739,991 人に対して避難率 14.6% となった。益城町の避難人数は 4 月 17 日に約 16,050 人に達し、町人口 33,748 人に対して避難率 48% に達した。

本研究では、熊本市消防局 (職員数 802 人、平成 29.4.1 現在) による救助・救急活動の概要 (4 月 14 日～5 月末) について統計資料を提供頂いたので、熊本市消防年報¹⁾ の報告も参照してその分布状況を整理するとともに、最も被害の集中した同消防局益城西原消防署でのアリング結果をまとめる。また、消防活動について、2004 年新潟県中越地震、同じ九州で発生した 2005 年福岡県西方沖地震²⁾ と比較考察する。3 つの地震の規模、発生日時、人的被害を表 1 に示す。2004 年新潟県中越地震は、余震回数が非常に多い地震で、被災地人口約 35 万人の地域で避難者が 10 万人に達し、車中泊やエコノミー症候群での犠牲者が出た³⁾。

2. 熊本市消防局の救助、救急等活動件数の推移

1) 119 番通報推移

熊本市消防局への 119 番通報件数を図 2 に示す。14 日の前震直後から、1 時間に 250 件、200 件、150

表 1: 2016 年熊本地震、及び 2004 年新潟県中越地震と 2005 年福岡県西方沖地震の概要

	2016 年熊本地震	2004 年中越地震	2005 年福岡県西方沖地震
前震日時,M	4 月 14 日 (木) 21:26 M6.5		
本震日時, M	4 月 16 日 (土)02:25 M7.3	10 月 23 日 (金)17:56 M6.8	3 月 20 日 (日)10:53 M7.0
最大震度	前震：益城町 7 本震：益城町、西原村 7	川口町 7	福岡市東区、同市中央区、 前原市、みやき町 6 弱
人的被害 ^{*1}			
死者	直接被害 50 人	46 人	1 人
死者	関連死 90 人 (市認定 82 人)		
死者	6 月豪雨で地震関連認定 5 人		
重傷・軽傷	1017・1467 人	631・4162 人	75・954 人

件と通報が続き、合計 600 件以上の 119 番通報が入ったことがわかる。16 日午前 1 時 25 分の本震後には、午前 1 時～2 時の間に 60 件余り、午前 2 時から 1 時間ごとに、約 280 件、約 260 件、約 110 件と続き、余震に比べ、その通報数がなかなか減らなかった状況がよみとれる。4 月 16 日の 119 番受付件数は 1,727 件に達し、平成 27 (2015) 年度一日平均の 12.5 倍に達した (表 2)。4 月 14 日～16 日の 3 日間の通報 2,822 件のうち、固定電話 (IP 含む) が 21 %、携帯電話が 79 %を占めている ¹⁾。熊本市と益城町、西原村の世帯数合計 330,358 世帯に対して、4 月末までの通報累計が 6,512 件にのぼり、世帯数の 1.98 %に相当した。

福岡市消防局への 119 番通報は地震発生から 12 時半までの約 2 時間に 1,113 件受信があったが、うち 22 %のみ受け付けできたと報告がある ²⁾。熊本地震は夜間の発生で被害把握に時間を要し、通報が遅れた可能性がある。

2) 救助件数

2004 年新潟県中越地震における小千谷地域消防本部 (人口約 49,000 人の地域で死者 22 名) の記録によ

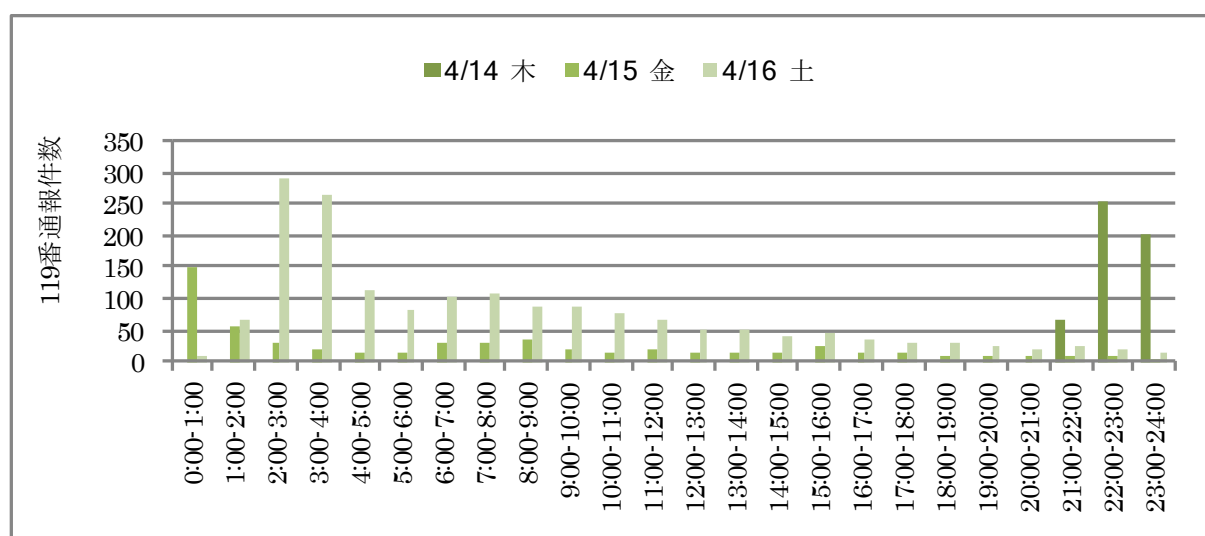


図 1 熊本市消防局への 119 番通報件数 (前震発生の 4 月 14 日 (木)～16 日 (土)24 時まで)

^{*1} 熊本地震の被害は熊本県災害警戒本部まとめ (2016.11.22 現在、第 196 報) による

表2 熊本市消防局への119番通報件数

日付	曜日	119受付合計	H27年度1日平均	昨年1日分受付と地震後 119通報との比率
4/14	木	519	138	
4/15	金	576	138	417%
4/16	土	1,727	138	1251%
4/17	日	587	138	425%

れば、地震当日24時までに133件、翌日10月24日0時～24時までに202件の通報があり、23日～10月31日までの9日間にのべ773件の通報があった³⁾。

熊本市消防局による救助件数と種類(図2)、救助人数と熊本県報告による前震・本震の直接原因の死者数(図3)を示す。死者数の救助人数に対する比は、熊本市で4/120、益城で20/65、西原村で5/34と大きな差がある。熊本市での救助は「建物閉じ込めエレベーター含む」が57%と多く、益城町では建物倒壊が81%と多い。救助を消防局・消防隊員だけでなく、消防団や近隣住民が行ったケースも多いと思われる。文献3によれば、益城町消防団では前震で11件19名の救助活動、救急搬送のフォロー、地域住民の安否確認等を行い、本震後には16件32名の救助活動を行ったとある。

熊本市内各区と2町の建物火災件数は9件、消防局による救助件数は116件、救急件数は1,367件であり、救助件数を世帯数で、救急件数を人口数で割り図4に比較する。益城町の救助と警戒が1000世帯あたり約4件と最大で、救急は人口1000人あたり約7.5人となり、西原村の傾向も同様である。熊本市の中央区、東区、西区は救助、警戒、救急の比率が並んでおり、益城町・西原村より低い。

2005年福岡県西方沖地震では救助事案は玄界島等少数で、救急事案が109名(その80%は地震当日)であった²⁾。2004年新潟県中越地震では火災件数が9件、消防による救助件数は43件であり、救急件数は1,260件(人口1000人あたり2.8件)であった。そのうち、小千谷地域消防本部の管轄(震度7の川口町を含む)では火災2件、救助17件(1000世帯あたり救助1.16件)、救急488件(人口1000人あたり9.9件)に対応した³⁾。小千谷地域に比べ、益城町、西原村での世帯あたり消防救助件数は3倍～2倍多く、人口あたり救急件数はやや低い。避難所で保健衛生を保つ取り組みが12年前より進んできていること、新潟県中越地震は晩秋の寒冷期に発生した影響も考えられる。

熊本地震による労働災害発生状況⁵⁾によれば、

前震・本震の際、34件の労災が発生し、その事故の型別にみると、高温・低温の物との接触11件、転倒10件、墜落・転落2件、激突3件、踏み抜き2件、崩壊倒壊2件、その他4件となっている。傷病別では、骨折13件、ねんざ等4件、切創等3件、打撲3件、火傷11件である。また、災害復旧工事等による労働災害も158件発生している。

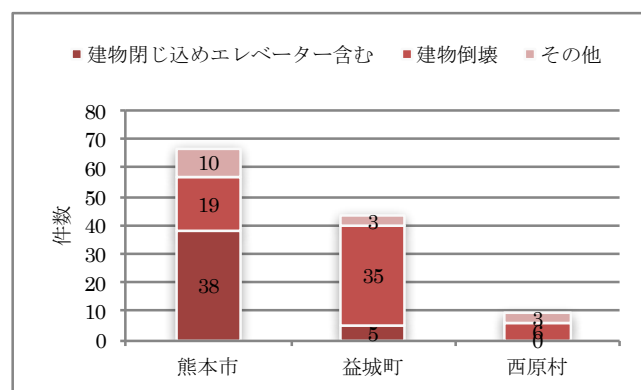


図2 熊本市消防局による前震・本震での救助事案の種類

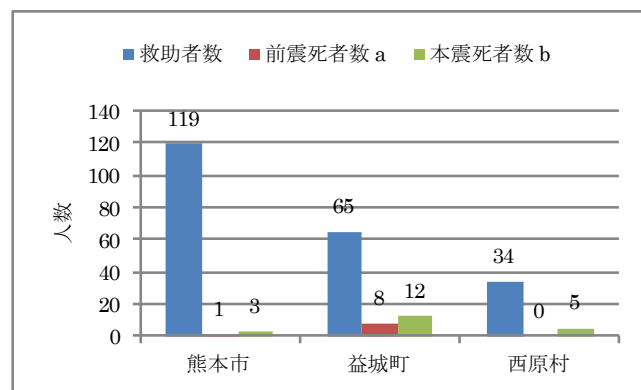


図3 熊本市消防局による前震・本震での救助者数と前震、本震死者数の状況

2005 年福岡県西方沖地震の際には、労働災害 128 件 (2005.5.26 現在) のうち、熱傷 40 %、打撲 26 %、切創 12 %、裂傷 7 %、骨折 9 %等があった²⁾。熊本地震は夜間に発生したため、職場にいた人が福岡県西方沖地震より少なかったと思われる。

3) 職員参集状況、応援隊

熊本市消防局による前震と本震の参集状況を図 6 に示す。前震は 1 時間後の参集はやや低いが、3 時間後には 98%に達し、本震では 1 時間後は 37%と事態の厳しさを受けて前震より高いが、3 時間後で 96%と前震よりやや低い。職員の住宅や家族の被害や道路被害等の影響が考えられる。

緊急消防援助隊の活動について概要を以下に示す。前震では主に熊本県内からの派遣があり、本震で援助隊の広域派遣が行われた。

最大派遣時部隊数	20 都府県	572 隊	2,118 名
延べ活動部隊数	約 4,300		
延べ活動人員	約 16,000 名		
航空隊	18 機	15 都府県	
県内消防本部応援	10 消防本部	31 隊	111 名
活動内容	倒壊家屋からの救出活動 余震に伴う警戒広報活動、 救急搬送		
活動地域	熊本市内・益城町、西原村・ 宇城地域・南阿蘇地域		

3. 益城西原消防署の活動

地震から約 2 か月後に、筆者ら山口大学研究班 (村上ひとみ、野崎紘平、金炫兌) は熊本市消防局益城西原消防署を訪ね、前震と本震発生当時の活動についてヒアリング調査 (写真 1～4) を行ったので以下にまとめる。写真 5、6 は益城町の被害状況である。

- ・時： 2016 年 6 月 10 日 14 時～15 時半
- ・対応：益城出張所、警防課二部の職員 4 名 (内 1 名は救急担当)

(1) 職員数

益城西原消防署に 39 名 (消防 1 隊 4 名、救急 1 隊 3 名、救助 1 隊 3 名)、24 時間交代、西原出張所に 11 名 (消防救急兼務)。

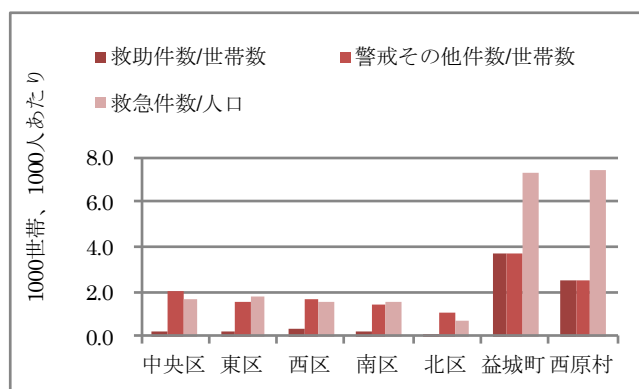


図 4 熊本市消防局における区・町別の救助件数、警戒その他件数、救急件数割合 (2016 年 7 月 13 日現在¹⁾)。人口・世帯数は熊本県統計課 2016.4.1 現在より)

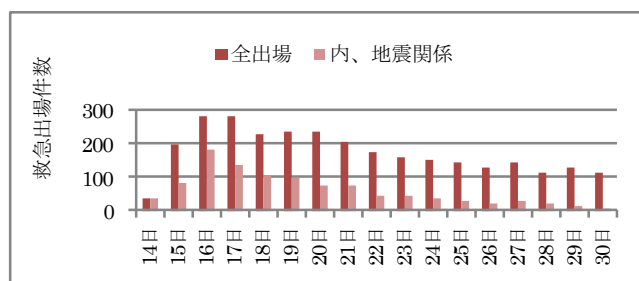


図 5 熊本市消防局における 2016 年 4 月 (前震以降) の救急件数推移

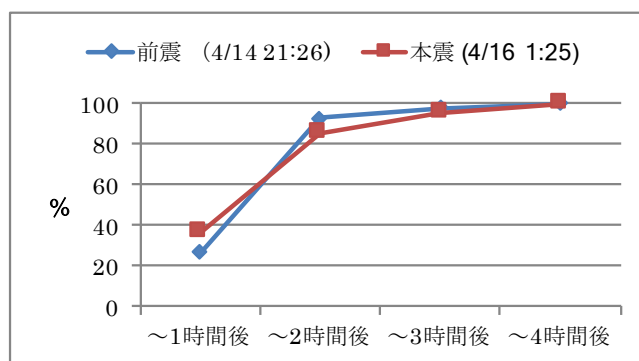


図 6 熊本市消防局における前震時と本震時の発災後時間と参集率



写真1 益城西原消防署



写真2 消防署でのヒアリングの様子



写真3 前震と本震の時刻を示す時計



写真4 道路被害に強い機動力あるバイク配備



写真5 益城町木山付近 (2016.4.24)



写真6 益城町堂園付近 (2016.4.23)

(2) 前震時の活動

- ・4月14日前震時の勤務人数：消防隊1隊、救助隊1隊、救急隊1隊、出張所も入れて計13名。
- ・参集状況： 通勤手段は自動車が多く、少数だがバイクの職員もいる。熊本市内在住が多いが、益城町、西原村に住む職員もいる。最も遠い職員は熊本市西区から24km通勤、彼は最寄りの南署に参集し(その時点で参集済みとカウント)、そのあと本署に向かった。
- 参集に要した時間・参集率： 1時間ほどでほぼ100%に近い。
- 道路状況、道路被害、渋滞など：国道や県道で通れない箇所あり、木山地区で渋滞あり。
- ・119通報、通信の状況： 消防庁舎が停電で使えず。書棚や食器棚、p cが倒れて足の踏み場なし。非常電源を使い、車庫で司令。無線、一般電話を利用。消防局内線で連絡。停電等で、指令書が印刷で

きないため、口頭で災害場所等を連絡確認して活動。住民から駆け込み通報あり。電気は1日くらいで復旧。・火災発生：前震で、益城町安永の倒壊家屋から出火1件、全焼3棟(母屋、物置等を含む)。火災はその後、本震では無し。

・救急搬送：タンスが倒れ、肺を直撃して、肺に障害のケースあり。高齢者が多い。近所の消防団に搬送された事案もあり。

(3) 4月14日(木)夜～4月15日(金)日中の対応

15日午前0時30分頃、県内から応援隊が到着していた。

4) 16日以降・その他

大きな避難所には赤十字やDMA Tの救護所ができて、応急手当など支援してくれたので、早めに対応できて助かった。車中泊の方や寝たきりの方のエコノミー症候群は何件か搬送した。地域に秋津川と木山川が流れており、段差や道路被害等で橋が渡れず、10分で行けるところ熊本市内まで迂回して1時間かかることもあったが、それが原因で重傷になったケースはなかった。隊によっては歩いて渡り活動した例もあり。前震後、家に入れない、怖いので外にいたり、注意していて、本震での人的被害の増大を抑えた面がある。

最初は徒歩で学校等に避難して、体育館等いっぱい、プライバシーがない状況で、車を取りに帰り生活用品を積んできて、車で寝泊まりした被災者も多い。車を農道の脇にとめたり、空き地はいろいろある。距離によって車の使用が変わるかも。公民館が近くにあり、そこに集まった住民も多いと思う。西原村は防災対応型訓練を年に1度実施、地区や学校での訓練で救急の話などしていた。

4. まとめ

2016年熊本地震で激甚かつ広域な被害を受けた熊本市、益城町、西原村を管轄する熊本市消防局の活動記録を整理し、その特徴を考察した。また熊本地震の消防活動を2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震での活動と比較した。益城町での1000世帯当たり救助件数は約3.7件で、新潟県中越地震で被害の集中した小千谷地域の1000世帯あたり1.2件に比べ、約3倍となった。消防署のヒアリングでは道路被害や橋の通行不能箇所も多く、停電、断水等消防署の機能も低下する中、厳しい救助や救急、警戒活動がされたことが判明した。今後の地震備え、防災力向上の参考にしたい。今後の課題として、熊本地震の特徴として、前震後に本震が発生したことがあり、2つの地震での避難行動や帰宅行動がどうなされたのか、それが人的被害にどう影響したのかが重要である。

謝辞

熊本市消防局及び益城西原消防署の職員には多忙の中、データ提供、ヒアリング調査に協力頂きました。ヒアリング調査には山口大学金炫兌助教、学生の野崎紘平君に協力頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

1. 平成29年版消防年報くまもと(平成29年版)、熊本地震関連、pp.97-111、2017.8。(2018.01.15参照)
http://www.city.kumamoto.jp/hpKiji/pub/detail.aspxc_id=5&id=17095&class_set_id=2&class_id=2003
2. 村上ひとみ：10.1 人的被害の原因と分布、福岡県西方沖地震災害調査報告書、日本建築学会、2005。
3. 村上ひとみ：2004年新潟県中越地震における人間被害と救急・救助活動の実態、基盤研究(B)「地震時救命ライフラインの機能維持と人的被災軽減に関する研究」報告書、2005。
4. 本田寛：平成28年熊本地震災害報告、総合情報誌「地域防災」、2016年12月、pp.18-19。(2018.02.01参照)
http://www.n-bouka.or.jp/local/pdf/2016_12_18.pdf
5. 厚生労働省：「平成28年熊本地震」関連労働災害発生状況について、平成29年3月15日現在累計(2018.02.01参照)
<http://kumamoto-roudoukyoku.jsite.mhlw.go.jp/library/kumamoto-roudoukyoku/abckikaku/0613saigai.pdf>

御嶽山火山防災にネットワークの一層の活用を

東濃地震科学研究所 木股文昭

A distinct advantage of internet to develop volcano disaster
at Ontake Volcano, central Japan

Fumiaki Kimata Tono Research Institute of Earthquake Science

Abstract

Now, we can recognize the crater location of the Jan.25, 2018 Kusatsu-MotoShirane volcano on the site of GSI Map by smartphone or tablet in the outdoor activities. The information via internet is distributed more promptly and wide-ranging than existing mass media such as TV, radio, and newspaper et al. In volcano disaster mitigation, we should construction more effective and convenient Web-sites using with digital map sites to inform the volcano activity and the volcanic control to climbers and tourists in the field, and to save their lives.

はじめに

スマホやタブレットは普及めざましく、登山者や観光客の多くが御嶽山にも持参し、現地から写真などをソーシャルネットワークに掲載する。このような状況を考えると、御嶽山噴火災害防止にも、既存の防災無線や登山口などでの公的な掲示板だけでなく、これらのネットワークによる情報の伝達や認識を行政側としても活用すべきと考える。

なにせ、国の首相すらツイッターなどを利用し、国民の対応を即座に試みる時代である。国や県といった機関でもこれらの即応性を積極的に活用すべきと考えられる。逆にいかに活用するかが、国の運命を握っているともいえる。

もう一つの意義は、ネットワークの持つ即時性、リアルタイムでの情報共有が、緊急時に一人の命でも救えることになるのである。そのよい具体例が気象庁が行う緊急地震速報である。このシステムは地震が発生しても、5km/秒ほどの速さで伝わる地震波を追い越し、その激しい揺れが人びとを襲う前に、地震波襲来を伝え、命を一人でも救えればというものである。

2014 年御嶽山噴火でも噴火の 10 分前に「ヤバイ」と思える火山活動(微動や傾斜変動の発生と継続)が観測されていた。即座にこの情報を山頂の登山者に知らせれば、一人でも命が救えたかもしれない。火山噴火による犠牲者を一人でもなくす観点から火山防災でのネットワークの活用を検討してみたい。

1. 多くの情報を多くの人びとと即座に共用可能な時代

ネットワークの充実

50 年前、連絡手段は電話と手紙だけ、寮生だった私は祖母から手紙をもらった。一生に一度の手紙だった。太平洋を越えたテレビの初の宇宙中継でケネディ暗殺が伝わった。しかし、今や海外、しかも人家などない調査フィールドでも即時にメールが届く。費用を問題にしなければ、テレビ電話もできる。ネットワークの拡充には目を見張る。

総務庁によると、携帯電話契約数は 2016 年度末で 1 億 5648 万件、広帯域移動無線アクセスシステムも含むと 2 億 1398 万件。日本は総人口が 1 億 2709 万余人 (2015 年国勢調査) で、ほぼ全国民、少なくとも中学生以上は携帯電話などを有するとなる。何処にいてもネットワークを通し、世界の情報を簡単に入手、通報される時代である。

このような環境で防災システムも急速に進展する。地震災害でいえば、緊急地震速報はまさに時代の落とし子である。これは、観測データをテレメータで即座に収集し、高速計算機で処理し、地震の震源と規模を求め、各地の震度を予測し、震度 5 弱以上と推定された地域に「強い揺れの襲来」を伝える。地震の位置と規模、各地の予想震度が推定できる地震学のポテンシャル向上と、同時に、1-2 秒でテレビやラジオ、広範な伝達手段のネットワークで人びとに伝えられる時代になったからである。

地震波が襲う前に緊急地震速報

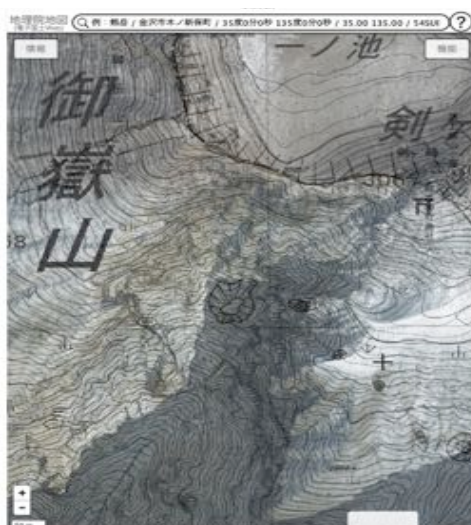
1983 年日本海中部地震で、仙台管区気象台は各地気象台から電話や電報で地震データを得て、手計算で震源と規模を求め、地震発生 14 分後に津波警報を発令した。人力の処理として迅速な対応だった。しかし、津波は地震発生から 7 分で襲っていた。

このような苦労の下、気象庁は緊急地震速報の実用化に取り組んだ。これは地震発生を直ちに観測し、地震の震源地と規模を即座に推定し、秒速 5-7km という地震波が人びとに襲うまでに、「強い地震動の到来」を伝え、一人の命でも救うことを狙う。もちろん、震源の近くは速報よりも揺れの方が速く、緊急地震速報は有効でない。

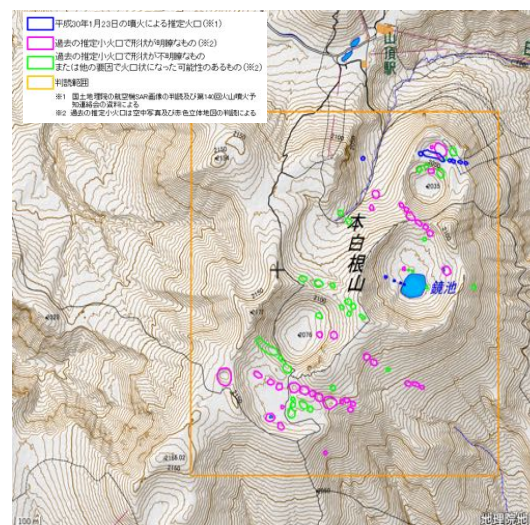
気象庁は各種の情報を発令し、緊急地震速報を除けば、全て予報官などの手を経る。緊急地震速報だけは、一人の手も煩わせずに、震源地近くの大きな地震波動の記録から自動的に発令され、マスコミや携帯電話から人びとに伝えられる。緊急地震速報は高速なデータ収集、処理、推定、そして情報伝達があつてこそ存在する。

多くの情報を共用

情報は流通が高速になっただけでない。共用できる情報が驚くほど多様になる。複数の情報を簡単に整理できる。一例として、御嶽山剣ヶ峰と本白根山周辺の地図と図 1 左右に示す。国土地理院の地理院



御嶽山剣ヶ峰周辺



本白根山 18 年 1 月噴火口が暫定だが追加

図 1 御嶽山と本白根山周辺の地形図 (地理院地図による)。地形図に火山基本図、空中写真などを重ねる。

地図(電子国土 Web)を利用し、地形図に火山基本図、御嶽山では空中写真のレイヤーを重ねた。これまでは各種の地図をまずはコピー機でスケール調整し、最後は頭の中で重ねる方法しかなかった。今や簡単に可視化できる。加えて、携帯電話やタブレットでは、内蔵の GPS 受信機を利用し、自分の位置を地図に示せる。まさに活火山に登りながら自分の現在地を知り、火口との位置関係が確認できる。GPS 位置決め精度、まさに数 m で現在地が把握でき、カーナビならぬ登山ナビにこの機能が利用できる。これに、登山情報を重ねれば、登山者向けの地図が完成する。しかも情報がまさにリアルタイムで更新できる。

地図情報の更新は、印刷物ならば頻繁でも数年から 10 年が精一杯、例えば、国土地理院も御嶽山の 2014 年噴火では、新たな火口位置を明記するのに 3 年以上が経過した。その点、ネットでデジタルデータならば確実に頻度は上がり、臨機応変な対応も簡便になる。

この種のサービスは Gmap が長けているが、地理院地図^{*1}など国の機関も同様なサービスを実用化する。これらのサービスを火山噴火などの災害対策に活用しない手はない。

もう一つの注目は、過去のデータを利用して、地域の時系列が専門家でなくても簡便にトレースできることである。東濃地震科学研究所周辺の地形の時間推移を図 3 に示す。Gmap から撮影時期の異なる空中写真、および地理院地形図を示す。

研究所周辺の開発整備状況が一目でわかる。1980 年までは何もなかった里山が 1980 年から造成され、市民プールが建設された。その市民プールもあつという間に埋められ、サイエンスワールドや深地層研究所が建設され、北側に延びる二車線道路が切り拓かれた。これを印刷物から整理しようとする県立図書館にでも出向く必要がある。Google Earth を利用すれば、より詳細な推移が求まる。

2. 御嶽山火山防災体制におけるネットワーク活用の現状と課題

今日、急速に発展するネットワークを防災や災害救援の場でもより活用すべきだ。しかし、防災や救援



図 2 東濃地震科学研究所周辺の推移、1975 年、1980 年、1990 年と地理院の地形図。

^{*1} 残念なことにスマホやタブレットで日常的に利用するには消費電力がや大きく、登山など簡単に電源補給できない時に困る。

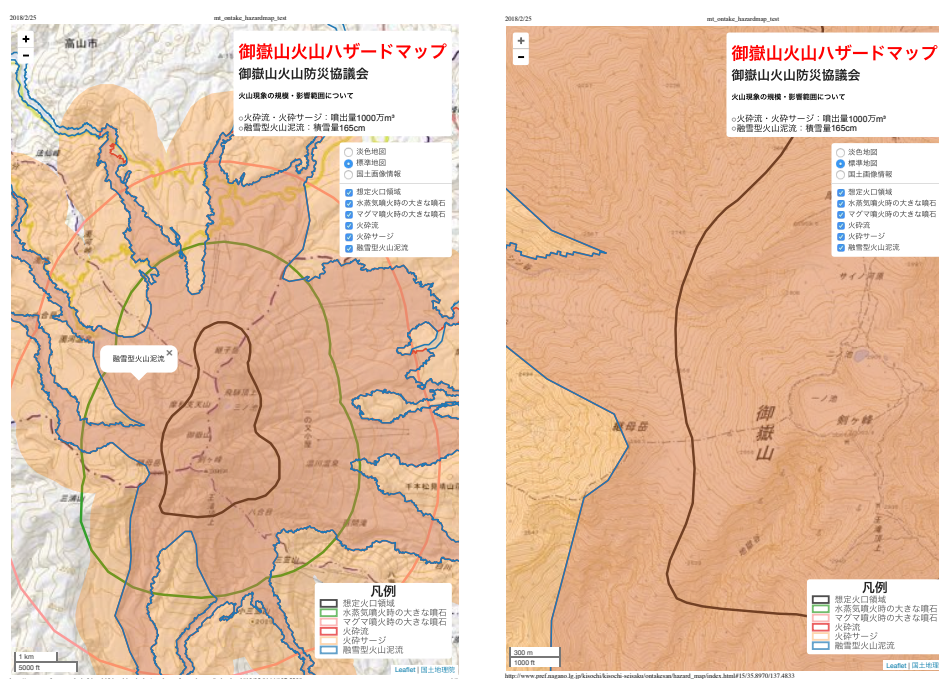


図3 御嶽山ハザードマップ(Web サイト) 左) 概観、右) 詳細 (御嶽山火山防災協議会(事務局:長野県木曽地域振興局))

の主役が国や県、市町村ゆえに危険性も含まれるネットワークの活用はなかなか進まなかった。

このような状況下、長野県は昨秋の防災訓練で、県の行政ネットワーク 緊急災害救援システムを情報の共通認識手段として積極的に活用した。噴火警戒レベル2の下で「御嶽山噴火」の想定から、防災体制の確認を訓練した。山小屋の様子など、各機関での情報を信頼度の評価も含め、システムの掲示板に書き込まれ、機関を超えた共通認識にした。これまでは電話とFaxによる情報伝達、しかも上意下達中心と比べ、重要な意義があった。

もともと、書き込みに時間がほとんど費やされ、調査が疎かになったという反省点もあった。また、岐阜県もほぼ同様な訓練を実施しながら、プログラムが、長野・岐阜県の両県それぞれの運用で、統合した訓練には、大きな課題を残す。活用を検討する前にネットワーク状況を記す。

1) 噴火ハザードマップの Web サイト

御嶽山では噴火防災について、長野・岐阜両県の合同で火山防災協議会^{*1}が結成され、噴火警戒レベルに対応した立入禁止区域を制定し、ハザードマップを作成する。協議会は事務局を長野県木曽振興局に設け、協議会 Web サイトも同振興局サイトの下に開設する^{*2}。

同サイトのハザードマップでは、水蒸気噴火時の大きな噴石や融雪型火山泥流などをメニューで選択し表示する(図3左)。明らかに印刷のハザードマップと比べ、表示の選択肢が多い。また、必要箇所を拡大表示できる(図3右)。

惜しむらくは、自分の現在地表示の機能と、ハザードマップをもっとも必要な登山者に対して、登山道や山小屋の明示のないことである。可能ならば、このハザードマップに現在の立入規制区域を重ね表示し、現況が確認できるようにして欲しい。

^{*1} 政府は2015年5月に、2015年に御嶽山噴火をうけ、気象庁が常時観測を実施する50の火山周辺の自治体に「火山防災協議会」設置と避難計画作成などを義務付ける活動火山対策特別措置法(活火山法)改正案を閣議決定した。

^{*2} 「御嶽山火山防災協議会」で検索

御嶽山火山防災協議会の Web サイト「御嶽山の安全対策情報 立入規制について」(図 4) では、御嶽山入山規制区域の図に、登山道や小屋が通行、使用可能かなど記される。しかし、ハザードマップのような選択メニューはなく。まして現在地の確認もできない。長野県としてハザードマップと現在の入山規制区域、そして現在地が表示できる Web サイト地図をぜひとも作成して欲しい。そのなかで、登山情報も選択表示できるようなレイヤーも加えることを早急に検討して頂きたい。

長野県の御嶽山噴火防災にたいする姿勢に比較し、岐阜県はまだ姿勢が極めて整っていない。県危機管理部防災課が管轄し、その火山防災のサイト(図 4、「火山防災」>「防災対策」>「岐阜県の火山と防災対策」)には、御嶽山火山防災協議会に関して一言も記されていない。重要な情報のほとんどが外部リンクとなる。携帯サイトとされるリンクも、普通の噴火防災パンフレットの pdf ファイルで、とても携帯用といえた品物でない。

加えて、御嶽山火山防災協議会の岐阜県側事務局の担当、飛騨県事務所は防災のサイトすら設けていない。国が活火山法で定める火山防災の要と位置づける火山防災協議会について、岐阜県は非常に冷淡と思える。

木曽地域振興局



更新日：2017年11月14日

御嶽山の安全対策情報

立入規制について

御嶽山は活火山です。現在、噴火警戒レベル1（活火山であることに留意）が気象庁から発表されています。

【御嶽山入山規制

図】

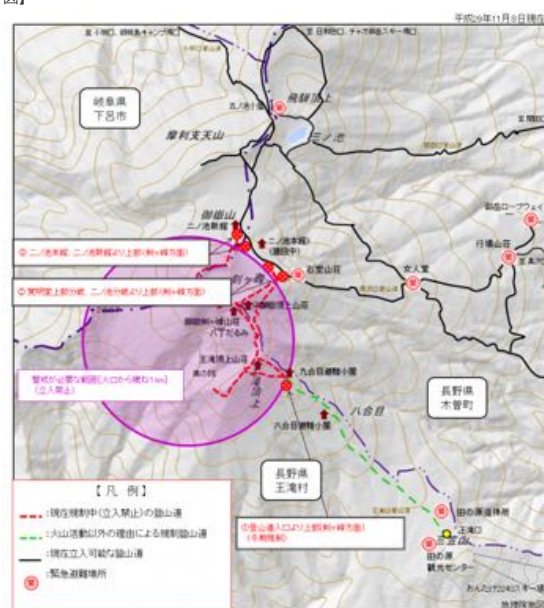


図 4 御嶽山火山防災協議会の web サイトで示される現在の御嶽山立入禁止区域

御嶽山噴火

- ・御嶽山噴火を踏まえた火山防災対策
- ・平成26年(2014年)9月御嶽山噴火に関する情報はこちら

御嶽山(おんたけさん)

- ・御嶽山の火山活動史(外部サイト)
- ・御嶽山火山ハザードマップ(PDF:1.01MB)
- ・御嶽山火山ハザードマップweb版(外部サイト)
- ・御嶽山の噴火シナリオ(PDF:3.67MB)
- ・御嶽山火山防災計画(PDF:9.34MB)
- ・御嶽山火山防災マップ(登山者向け携帯版)
- ・御嶽山の火山情報(火山登山者向け)(外部サイト)
- ・御嶽山の火山観測データ(毎日更新)(外部サイト)
- ・御嶽山の監視カメラ画像(外部サイト)



図 5 電子国土 Web を利用し、御嶽山剣ヶ峰周辺周辺の国土地理院地形図に火山基本図、空中写真^{*1}のレイヤーを重ねる。

2) ネットワークを活かした火山防災

スマホなどの登山地図地図アプリ

中校生以上の国民がほとんどが携帯電話などを所有、携帯し、どこにいてもインターネットと接する時代に入った。情報は家庭や会社にはない人々にも伝わり、それも一瞬に流通する。その反面、誤った情報が日本列島を駆け巡る危険性を含む。それだけに、インターネットの利点を見据えた防災対応が必要である。

私たちが半世紀前、御嶽山に登るならば、登山ガイドブックを読み、地理院 5 万分の 1 の地図を購入し、登山計画をそれなりに練った。しかし、昨今、御嶽山を複数ページで扱う登山ガイド本も 1 社のみとなった。もう、登山準備にガイドブックと地形図という時代でない。

一方で、インターネットを利用したデジタルマップが活用されるようになった。さすが Gmap ではそこまでの機能はないものの、地理院地図なども、現場で簡単に閲覧でき、現在地の表示など、利点がある。今後、多様な活用が確実に見込まれる。

スマホでは登山向けアプリも用意される。その一つ YAMAP での御嶽山登山マップ(図 6)では、山小屋やコース時間が記されながらも、立入禁止区域は表記されず、現在でも「冬季以外営業」という間違った案内がなされている。この種のサイトを運用する者として、現在の登山状況を正確に把握するのが社会的責務である。また、御嶽山防災協議会としても、「現在の登山できる状況を反映する」ことをサイト運用者に要請すべきである。もっとも長野岐阜両県が登山案内サイト(図 7)を運用すれば 1 番簡潔である。このような案内サイトの開設が、登山者や旅行者を御嶽山に安全に誘致する基本になると考える。



図 6 スマホの登山アプリ YAMAP で閲覧できる御嶽山の登山案内地図。2018 年 2 月閲覧

ネットデジタルマップを利用した迅速な情報共有

著者の能力では地理院地図にコメントや写真が挿入できない。でも、まもなく社会として図 7 に示す地理院地図などにコメントできるようになると確信する。もちろん、これらのコメントや写真などは、昨年から始まったネット活用の噴火防災訓練としても利用できる。県の災害緊急ネットワークによる掲示板への書き込み形式の情報共有から、一枚の地図から各種の情報が取捨選択して共有できるようになれば、電話と Fax に限られた情報伝達からまさに大転換である。もっとも国の首相すら SNS を政治活動に利用する昨今ゆえ、このような活用が余りにも遅いとも指摘できる。

Gmap が契機になり、国としても地理院地図のようなデジタルマップが簡易にネットワークで利用できるようになっている。とりわけ Gmap では豊富な空中写真、地理院地図では地形図が活用できる。しかも、Gmap では簡単に写真などが貼り付けられ、必要なコメントをレイヤーとして加えられるようになる。

もっとも、これらの情報をどのように公開するか、その検討が必要である。気象関連の民間会社では、一般市民などに豪雨や地震など主として気象災害に関する情報の書き込みサイトを用意し、公開するところもある。アメリカでも国の機関である USGS(米国地質調査所)が地震の震度マップでは、市民の体感震度を収集し公開する。国内でも民間のサイト運用会社が確実に取り扱うようになるであろう。それを TV 局が画像として利用するだろう。

火山噴火速報の迅速な連絡

2014 御嶽山噴火では、噴火直後に気象庁や噴火予定連絡会幹部により、噴火予知困難という言明(いいわけ)がなされた。しかし、噴火の 10 分前に規模の大きな微動と傾斜変動、いわゆる噴火活動の先行現象が観測されていた。ところが、当時の気象庁の現在のシステムでは、これらの情報を噴火災害削減に利用することができなかった。その理由の一つは、噴火速報という制度がなかったこと、もう一つは迅速な対処と情報伝達手段が用意されていなかったことである。

一方、気象庁は備える時間が僅か数秒から数分しかない緊急地震速報を 2007 年から導入し、テレビ放送などに提供する。もちろん、緊急地震速報の警報がなくても、大きなゆれが襲ってこない経験は誰もが持っている。私も 2 回、乗る電車が止まったが揺れが襲わなかったのを経験する。しかし、乗客の間で騒ぎはなかった。

緊急地震速報の的中確率は決して低くない。もちろん 100% でない。速報で、実際に揺れが襲い、予想震度の ± 1 が襲ったのを気象庁は的中と判断すれば、年間の中率は 2012 年度以降、79%、63%、89%、86% という。このような緊急地震速報は確実に減災に効果があるといえる。

2014 年御嶽山噴火を契機に、火山の周辺に立ち入る登山者などの命を守る行動をとるために、気象庁は 2015 年 8 月に噴火速報^{*1}を導入した。2018 年 2 月現在、発令のケースはまだない。18 年 1 月の草津白根山噴火では 1 人が犠牲になったが、噴火速報は発令されなかった。

噴火速報は緊急地震速報と比較し、その位置づけが曖昧である。緊急地震速報では推定される震度が 5 弱を超える時に警報、6 弱以上で特別警報、逆に震度 3~4 だと予報になる。しかし、火山噴火では噴火と同時に噴火規模を予測することが極めて困難で、噴火規模は考慮していない。噴火の先行現象は地震発生と比較し、より多く観測されながらも、そのデータから噴火規模の推定は困難である。

まして、緊急地震速報はこれまで多くの地震発生経過経験から、最初の揺れの強さにより、最大となる揺れの強さを推定できるようになってきた。ところが、火山では噴火に先行する火山性地震や微動、傾斜変動の大きさから噴火規模の推定は、現在のところ至難な状況にある。

さらに困難な問題は、いかに情報伝達するかである。緊急地震速報は揺れが襲う地域を考えれば、各地の TV 局のサービスエリアを対象域としてよさそうである。ところが、たとえば、御嶽山で大きな微動や傾斜変動が観測された場合、登山者や地元は噴火に備えなくてはならないが、長野県や岐阜県の TV 局がサービスエリア全域を対象にすべきかどうか、疑問を持つ。

現在のところ、噴火警戒レベルとは異なり、噴火備えた情報をだすほど、観測データが蓄積されているわけでない。大きな誤差要因を抱えながらも試みになる。

大きな微動・傾斜変動発生を一刻も早くエリアメールで

噴火速報は緊急地震速報と比べ明らかに簡単でない。しかし、これまでの噴火では、噴火の直前に大きな微動や傾斜変動が観測されている。これらの情報を火口近傍にいる登山者などに伝えれば、登山者も命を守る行動ができるかもしれない。それが 10 分では火口から直ちに安全なところへ移動できない



図7 デモンストレーション 国土地理院地図に登山できる登山道や立入禁止を示した地図、このような登山案内マップを長野岐阜両県が作成したらよい。

^{*1} 本文は短く、「〇〇山で、平成△△年△△月△△日△△時△△分頃、噴火が発生しました」

が、少なくとも岩陰に隠れるなどの行動や、少しでも火口から遠ざかる行動が期待できる。もっとも、既知の噴火口で噴火するとは限らないという危険性は残る。

加えて、もし噴火しないときにどのように警戒を解くかも課題である。緊急地震速報は解除の必要がない。速報から 2-3 分経過しても、大きな揺れが襲わなければ、避難を止めればよい。しかし、噴火は数時間後や数日後、一月後という場合も多々ある。噴火予報の解除も簡単でない。もっとも御嶽山では数ヶ月火口近傍の立入を禁じるのが妥当と協議会は判断している。

それだけに、この情報はテレビなど広域を対象にする手法、いわゆるマスメディアは相応しくない。適切なのは、山頂の噴火口をはじめ、地元の王滝村、木曽町三岳・開田地区、高山市の高根地区日和田地域、下呂市小坂町濁河地域といった範囲である。そうならば、携帯電話のエリアメールが適当ではないだろうか。気象庁から、いかに狭い地域のエリアメールを発信できるかも、当面の課題である。

1 人の命でも守るために、私たちは持っている科学と技術のあるゆるもの全てを活かしたい。そのキーポイントはインターネットをいかに活用するか。私たちは防災にインターネットをもっともっと活用したい。これが本論のまとめである。

地域地震防災基準に関する基本問題研究委員会

委員等名簿 (任期 : 平成 28~30 年度)

【委員】

磯打千雅子	(国) 香川大学四国危機管理教育・研究・地域連携推進機構	特命准教授
大西 一嘉	(国) 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻	准教授
岡田 成幸	(国) 北海道大学大学院 工学研究院 建築都市空間デザイン部門	教授
清野 純史	(国) 京都大学大学院 地球環境学堂	教授
久世 益充	(国) 岐阜大学 流域圏科学研究センター	准教授
崔 明姫	(学) 立命館 立命館大学 衣笠総合研究機構	専門研究員
志垣 智子	(福) 敬友会 高齢者住宅研究所	研究員
鈴木 光	減災アトリエ	主宰
豊田 祐輔	(学) 立命館 立命館大学 政策科学部	准教授
中嶋 唯貴	(国) 北海道大学大学院 工学研究院	助教
野口 竜也	(国) 鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻	助教
能島 暢呂	(国) 岐阜大学 工学部	教授
延原 理恵	(国) 京都教育大学 教育学部	准教授
古川 愛子	(国) 京都大学大学院 地球環境学堂	准教授
松岡 昌志	(国) 東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系	准教授
村上ひとみ	(国) 山口大学大学院 創成科学研究科	准教授
柳澤 孝一	(国研) 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター地層科学研究部	特別嘱託
和藤 幸弘	(学) 金沢医科大学医学部 救急医学	主任教授
大保 直人	(公財) 地震予知総合研究振興会 地震防災研究部	副首席主任研究員
太田 裕	(公財) 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所	客員研究員

※ (国) 国立大学法人 (独) 独立行政法人 (学) 学校法人 (国研) 国立研究開発法人
(福) 福祉財団法人 (公財) 公益財団法人

敬称略 50 音順

2017 年度地域地震防災基準に関する基本問題研究委員会の開催

2017 年度の地域地震防災基準に関する基本問題研究委員会を 1 回、平成 30 年 1 月 9-10 日に地科学研究所 1F セミナー・ルームにて開催した。委員 12 名とオブザーバー 2 名、事務局員 1 名が参加し、12 名が話題を提供した。

これら平成 29 年度に実施した研究発表を東濃地震科学研究所 Seq.No.41 として出版する予定である。

平成 29 年度第 1 回地域地震防災基準に関する基本問題研究委員会

日時: 平成 30 年 1 月 9 日(火)-10 日(水)

場所: 瑞浪地科学研究所 1F セミナールーム

出席者: 大西一嘉・岡田成幸・久世益充・志垣智子・野口竜也・能島暢呂・松岡昌志
村上ひとみ・柳澤孝一・大保直人・太田 裕 (11 名)

オブザーバー: 小山真紀・岡田尚子 (2 名)

事務局

木股文昭 (1 名)

研究活動の紹介と議論

1. 大西一嘉 地震時の避難空間としてのコンビニの活用可能性に関する研究
2. 岡田尚子 2016 年熊本地震における要配慮者への福祉避難所対応の課題
3. 野口竜也 2016 年鳥取中部の地震について
4. 太田 裕 text mining 分析法のより良き活用のために一事例の紹介
5. 志垣智子 1994 年以前の地震に伴う人間被害発生特性 - 外傷系 (地震工学)
6. 久世益充 カーネル密度推定と混合正規分布モデルによる地震動波形の包絡線近似と地震動特性の考察
7. 大保直人 資料配付「リアルタイム地震被害情報の実験配信」
8. 岡田成幸 防災視点から見た Quality of Life - カラダとシサンとココロの定量的状態評価 -
9. 松岡昌志 航空写真を利用したディープラーニングによる熊本地震の建物被害推定の可能性
10. 村上ひとみ 和歌山県における自転車による津波避難の取り組み
11. 小山真紀 岐阜県美濃東部における防災組織の現況と課題
12. 木股文昭 災害の観点から考察する 2014 年御嶽山噴火 (1) 何が訴訟されたか

東濃地震科学研究所報告 第41号(平成29年度)
地域地震防災基準に関する基本問題研究委員会報告書
公益財団法人 日本地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

*Report of Bases Research Committee on Local Earthquake Disaster Mitigation
Proceedings of the Tono Research Institute of Earthquake Science,
Seq. No.41, March, 2018*

*Tono Research Institute of Earthquake Science
Association for the Development of Earthquake Prediction, Tokyo, Japan*

発行 2018年3月 March, 2018
(公財)地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所
所長 石井 紘
〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-63
Tel +81-572-67-3105 Fax +81-572-67-3108
<http://www.tries.jp/>
*Association for the Development of Earthquake Prediction(ADEP)
Tono Research Institute of Earthquake Science(TRIES)
Director General Ph.D. Hiroshi ISHII
509-6132 Yamanouchi 1-63, Akiyo, Mizunami JAPAN*
印刷製本 株式会社 サン・ライン 瑞浪市土岐町1022-3