

人的被害規模に及ぼす津波防災施設の影響に関する考察

徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻

志方 建仁*・杉本 卓司*・村上 仁士*・上月 康則*・倉田 健悟**

The effect of tsunami disaster prevention facilities on the decrease of human damage

Takemi Shikata*, Takuji Sugimoto*, Yasunori Kouzuki*, Kengo Kurata**, Hitoshi Murakami*

Department of Ecosystem Engineering, University of Tokushima

2-1 Minami-josanjima, Tokushima 770-8506, Japan*

Research Center for Coastal Lagoon Environments, The Shimane University

1060 Nishi-kawatsu, Shimane 690-8504, Japan**

In this study, the effect of the construction of tsunami disaster prevention facilities on the decrease of human damage is discussed at Usa district of Kochi prefecture, Shikoku Island. The rate of human damage was reduced from 1/100 to 1/10 as a result of the construction. However, it was pointed out that the damaged area of Usa district in the 1854 Ansei Nankai earthquake tsunami is still dangerous and residents have to evacuate quickly.

1. はじめに

四国・紀伊半島の沖に位置する南海トラフ沿いでは、100～150年の間隔で南海地震と呼ばれるマグニチュード8規模の巨大地震が繰り返し発生しており、その被害は中部地方から九州ときわめて広域にまで及んでいる。2001年9月、政府の地震調査委員会の発表によると、次の南海地震の発生確率は今後30年以内に40%、同50年以内に80%、その規模は既往最大であるマグニチュード8.4程度、また東南海地震と同時に発生した場合はマグニチュード8.6前後と予測されている。一方、近年の経済不況にくわえ、国民の環境への関心が高まりを見せており、海岸構造物の整備などに代表される大規模な公共事業による防災対策の実施は困難な状況にある。そのため、現況の設備を効果的に活用した津波防災対策や、迅速な避難を行うための整備や体制づくりが望まれている。

近年、防波堤や防潮堤などに代表される防災施設の整備は着実に進められてきた。このため、1707年10月28日(宝永四年十月四日)の宝永地震や1854年12月24日(嘉永七年十一月五日)の安政南海地震に比べて津波の集落への流入規模は大幅に低減されたといえる。しかしながら、1960年以降、海岸および河川堤防には、高潮対策としての防潮水門や日常的な用を資するための陸閘などの門扉が急激に建造されたため、津波来襲時には迅速にこれらの門扉を閉鎖しなければならない。これらのことから、防災施設の形態は過去の南海地震発生時に比べて大きく変化しており、次に発生する南海地震津波による犠牲者を減らすためにも、これらが次の南海地震津波による人的被害規模に及ぼす影響を把握しておく必要がある。

本研究では、次の南海地震の防災対策を検討するため、津波防災施設の変遷に着目し、それが津波による人的被害規模に及ぼす影響について検討を行った。ここでは、次の南海地震と同規模であり、比較的過去の被災記録が多く残されている1854年の安政南海地震(マグニチュード8.4)による津波を対象とした。

2. 津波数値計算および人的被害予測

ここでは、津波防災施設の変遷が津波による人的被害規模におよぼす影響を把握するため、安政南海地震当時の地形等をできる限り再現し、当時と現況での津波の挙動および人的被害発生メカニズムについて比較・検討を行った。

2.1 津波数値計算方法

ここでの津波数値計算は、すでに著者らが行っている手法(村上(1996, 1997))に準じた。表-1に領域ごとの解析条件をまとめた。

a) 支配方程式

津波の数値計算に用いる支配方程式として、水深の深い領域1では移流項と摩擦項を無視した線形長波方程式、沿岸域を含む領域2～4では非線形長波方程式を用いた。

b) 領域の接続

ここでは外洋で空間格子を粗く、沿岸部に近づくと格子間隔を細かくする従来と同じ方法を用いた。

c) 計算領域

対象地域は南海地震による津波の被害を繰り返し受けてきた高知県土佐市宇佐地区(以下宇佐地区と

略称)とした。図-1 は、現況における宇佐地区である。ここで、宇佐地区が 225m×225m の区域に分割されているのは、人的被害の予測で用いるためである。計算領域には、断層モデルを含んだ最も大きい領域から宇佐地区へと徐々に計算格子を小さくしていき、宇佐地区周辺の地形をなるべく正確に表現した。なお、本計算では、最小格子間隔である 19.5m よりも小さい川幅の小河川(水路を含む)については考慮していない。

d) 粗度

水域および陸域における摩擦係数は、表-2 に示した Manning の粗度係数を用いて評価した。

e) 解析条件

計算時間間隔は全ての領域で 1 秒、再現時間は 2 時間とした。

i) 安政南海地震発生当時の場合

防波堤や防潮堤などの津波防災施設は存在せず、また地形および土地利用条件については、防波堤などの建設により海域に発生した堆砂部分を取り除き、一様に田畑が分布しているものと仮定した。また、初期水位は当時の潮位である T.P. -36cm(主要 15 分潮による推定値)とした。

ii) 現況の場合

津波防災施設として、防波堤や防潮堤、防潮壁、陸閘、水門があり、地形および土地利用条件は現況のものを用いた。また、初期水位は津波の危険度が最も高くなる満潮位に設定した。

2.2 人的被害予測手法

本研究では、人的被害者数の算出に島田ら(2000)が提案した住民の避難行動を考慮した手法を用いた。なお、ここでは地震動による家屋の倒壊などの被害は考慮せず、津波による被害のみを推定した。

a) 避難開始時間

津波による人的被害者数は、住民の避難開始時間により大きく変動する。このことから、避難開始時間を地震発生から 0 分(直後)、5 分、10 分、15 分、20 分、25 分の 6 ケースを想定し、それぞれについて人的被害を推定した。

b) 避難速度

避難は歩行のみを行うものとし、自動車などの移動手段は用いないと仮定した。消防科学センターによると、ベビーカーを押している人の平均歩行速度が 1.07m/s、子連れの人が 1.02m/s、老人の単独歩行時が 0.948m/s、老人のグループ歩行時が 0.751m/s である。住民の避難速度としては、これらのうち最も歩行速度の遅い老人のグループ時の歩行速度である 0.751m/s を採用した。

表 - 1 各計算領域の解析条件

領域番号	1	2	3	4
基礎方程式	線形長波方程式		非線形長波方程式	
底面摩擦	Manning の粗度係数			
境界条件	沖	透過条件	隣接する境界との接続	
	岸	反射境界		遡上境界
波源モデル	Manshinha-Smylieの断層モデル, 相田の断層パラメータ			
格子間隔	1250m	312.5m	79.125m	19.5m
計算時間間隔	1秒			
再現時間	2時間			

表 - 2 Manning の粗度係数の分類

地形条件		Manning の粗度係数
陸域	陸域でT.P.+10m以上	0.160
	住宅密集地	0.160
	市街地	0.120
	田畑	0.020
	その他の領域	0.040
水域	水深5m以浅	0.040
	水深5mより深い	0.025

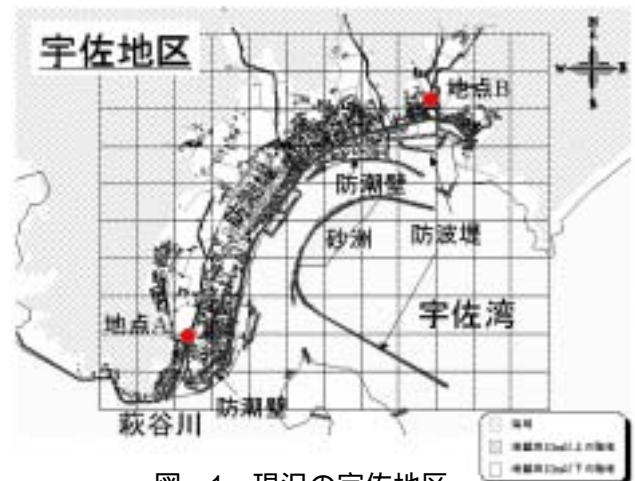


図 - 1 現況の宇佐地区

c) 避難場所

浸水範囲に含まれる建物は鉄筋コンクリート造りの構造物なども含め避難場所として除外し、標高 10m 以上の場所(図-1 中、斜線の領域)を避難場所に設定した。

d) 人的被害発生条件

50cm の浸水高はほぼ成人の膝の高さに一致し、それ未満の浸水高ではまだ避難行動が可能と判別し、50cm を越える場合には避難行動が困難となり、その区域内にいる住民は人的被害を受けるものとした。

e) 人的被害の算出

過去の歴史地震においては、当時の高知県土佐市宇佐地区の人口やその分布状況の詳細が不明であり、当時と現況の人的被害者数を比較することはできない。このため、宇佐地区を図-1のような区域(225m×225m)に分割し、住民はそれぞれの区域に一様に分布するものと仮定し、人的被害率を次式のように定義した。

$$R_i = I_i / P_i$$

ここで、 R_i 、 I_i 、 P_i は、区域 i における人的被害率、人的被害者数および人口である。

ここでは、個々の区域における人的被害率から人的被害規模の把握を試みた。人的被害率の算定は5分ごとに行い、1区域の住民が避難完了、あるいは住民の全員が人的被害に遭うまで繰り返した。

詳しい計算方法については、島田ら(1999)を参照されたい。

3. 津波挙動の変化

まず宇佐地区において、安政南海地震津波(以下、安政津波と略称)の再現性の検討を行った。その上で、津波防災施設が整備された現況では、どのように津波の挙動が変化したのかを最大浸水高分布と水位の時間的变化から検討した。

3.1 安政南海地震津波の再現性

ここでは、津波数値計算により得られた計算値と実際の観測値と比較することで、本数値計算の再現性を検証した。

対象地域である宇佐地区では、安政南海地震により、家屋のほとんどが流出し、70 余人の死者を出した。安政津波は、『真覚寺日記』によれば、「真覚寺は波先キ入来るを見て手早く什物不残長持二納め本堂の巽に当れる地面二置守護する内浪門内へ入来たり本堂の前より庫裏を廻りけれ共地形小高きゆへ礎をも湿さず引退く依而寺内什物本尊過去帳を始諸道具壱つも流出せず」とあり、津波の挙動や浸水痕跡が詳細に示されている(図-2 中の地点 1)。また、同日記には、「正念寺八本堂計残り仏具類過半流出庫裏八半町程北ノ方ニ流止り柱折レ潰込む」ともあり、津波による旧記の流出が記されている(図-2 中の地点 2)。さらに、今村(1938)によれば、安政碑の立っている位置は津波浸水線よりも約1m 高いところにある(図-2 中の地点 3)とされており、これらの記録をもとに津波の痕跡高調査がなされている。

図-2 に、安政津波の再現計算より得られた、宇佐地区における最大浸水高の分布を示した。また、この図中には安政津波の痕跡高調査による観測値と再現計算による津波の最大遡上高も示した。最大浸水高の最も大きくなるのは萩谷川河口部北側の地域で

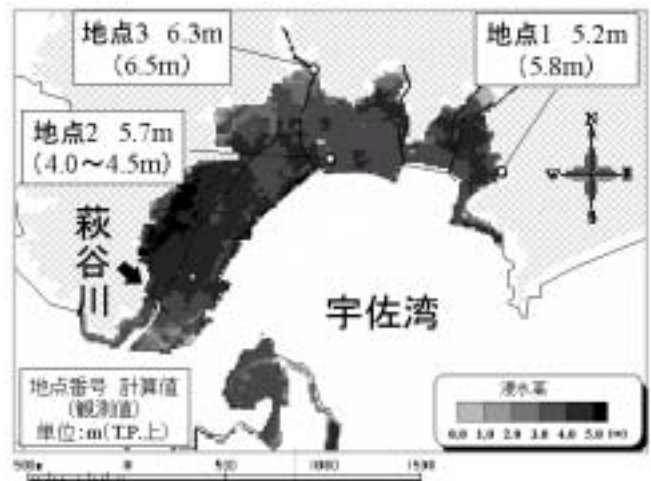
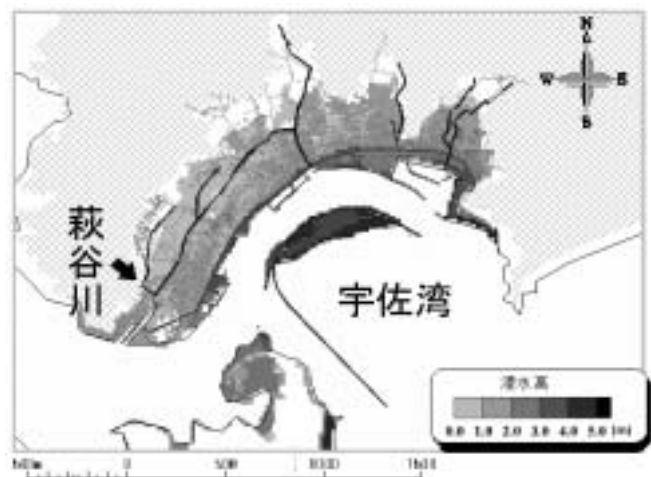
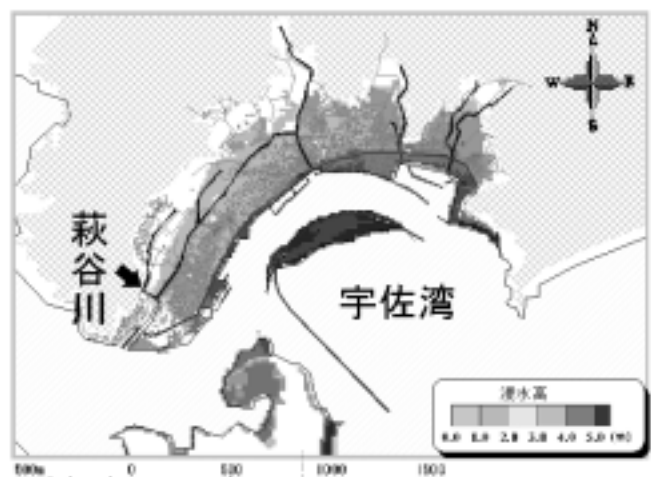


図 - 2 安政南海地震津波の再現計算結果



(a) 陸開・水門開放時



(b) 陸開・水門閉鎖時

図 - 3 現況における最大浸水高分布

あり、とくに山際へ近づくとつれ大きくなっていることがこの図からわかる。再現計算結果と観測値を比較すると、地点1,3では、計算値と観測値がほぼ同じ値を示した。しかしながら、地点2では、計算値が1.2~1.7mほど小さい結果となった。この理由としては、観測値に用いられている記録が曖昧であり、信頼性に欠けることが考えられる。ただし、全体としては当時の浸水状況をほぼ再現できていると捉えることができる。

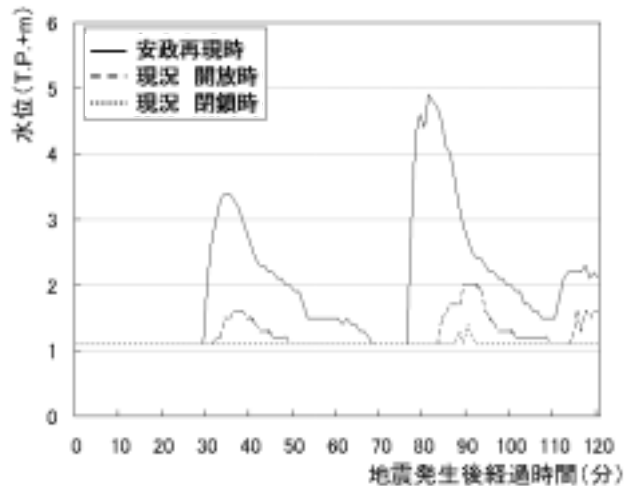
3.2 浸水範囲および浸水高の変化

図-3は、現況において陸閘・水門が開放した場合および閉鎖された場合の最大浸水高分布を示したものである。安政津波の再現計算では(図-2参照)、浸水範囲が山際まで広がったのに対し、現況では防波堤や防潮堤、防潮壁といった津波防災施設が建設されたことにより、浸水範囲は低減され、その浸水高も約2~3mだけ小さい結果となった。しかしながら、萩谷川河口部には水門が設置されており、さらに周囲の河川堤防には多くの陸閘も設置されている。そのため陸閘・水門が開放されていた場合には、萩谷川河口付近から津波が流入し、浸水範囲は閉鎖時に比べて約1割増大した。とくに、萩谷川河口付近は防潮堤が最も低くなる場所であり、さらに河口部北側の地域は宇佐地区において最も地盤高が低い。このため、河口部から流入した津波が内陸にまで遡上し、浸水範囲が大きくなったと考えられる。

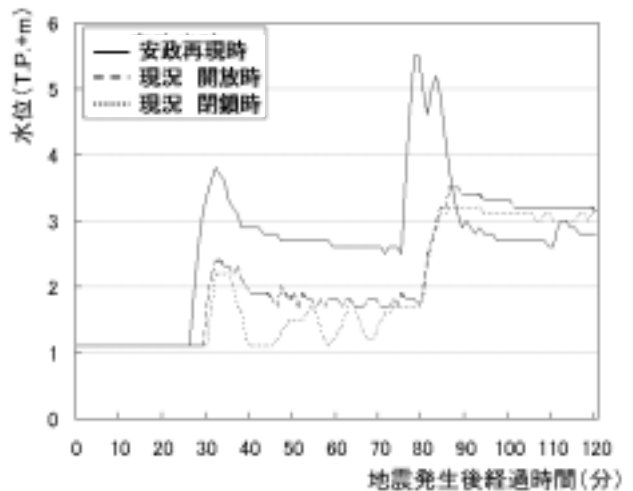
3.3 津波浸水特性の変化

図-4に、地点A,B(ともに地盤高T.P.+1.1m、図-1参照)における水位の経時変化を示した。地点Aは、萩谷川河口部に設けられた水門の内陸側にあたる場所であり、宇佐地区において陸閘・水門が開放されていた場合には、津波が萩谷川を遡上するために浸水してしまう箇所である。また、地点Bは過去の津波による被害が大きかった地域であり、現在ではこの地点と海域の間に防潮堤と防潮壁が整備されている。

地点Aについてみると、安政再現時では津波の第1波により地震発生から32分後に水位が3.0mを越え、また80分後には5m近くまで達した。現況において陸閘・水門が閉鎖されていた場合には、地震発生から88分~91分に水位が1.4mまで上昇したのみであった。このことから、地点Aでは、防潮堤が低いにもかかわらず、陸閘・水門が閉鎖されたことで津波の陸域への流入量は大幅に低減されていることがわかる。しかしながら、陸閘・水門が開放されていた場合には、津波は地震発生後32分に浸水し始め、84分後にも再び浸水がみられた。水位の最大値は



(地点A) 萩谷川河口部



(地点B) 宇佐地区北部

図-4 水位の経時変化

2.0mと安政再現時に比べて小さいが、陸閘・水門を閉鎖しておくことで、津波の流入を低減する効果が得られる。

次に、地点Bについて考察を行う。地点Bでは、地点Aに比べ、安政再現時・現況とも全体的に水位は高い結果となった。現況では、安政再現時に比べて全体の水位が低くなったが、陸閘・水門の開閉状況にかかわらず、津波第1波目から浸水が始まっていた。また、地震発生から約85分以降は、安政再現時に比べて水位が高い状態に保たれていた。このことから、防潮堤は津波の流入を低減する一方で、堤内地に溜まった海水の排除を妨げることが考えられる。これは、被災後に復旧・復興作業を行う上で、今後検討していくべき重要な課題のひとつである。

4. 人的被害規模の変化

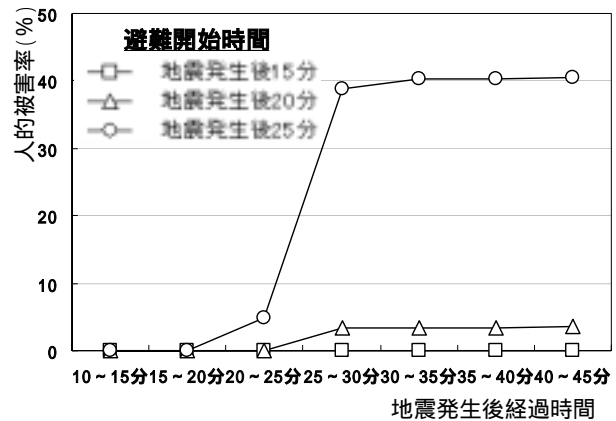
図-5 に、宇佐地区の安政再現時及び現況において、安政南海地震による津波を想定した場合の人的被害率の時間的な推移を示した。さらに、図-6、図-7 には、住民が地震発生後 20 分および 25 分に避難を開始した場合の人的被害率の平面分布を示した。ここでは、宇佐地区における人的被害率の時間的な推移と平面的な分布から、人的被害発生メカニズムについて検討を行った。

4.1 安政再現時における人的被害規模

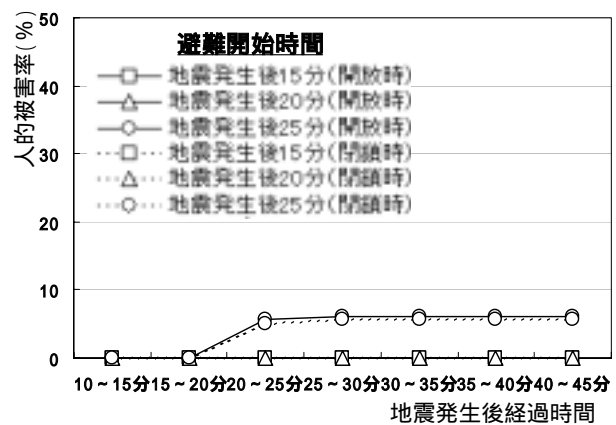
津波防災施設が整備されていなかった安政再現時(図-5 (a))において、住民の避難開始が地震発生から 15 分後の場合の人的被害率は 0.1%，20 分後では 3.5%であり、さらに 25 分後になると 40.4%と宇佐地区の大半の住民が被害を受ける結果となった。住民の避難開始時間が 20 分から 25 分後と 5 分遅れた場合には、人的被害率が約 12 倍にまで増大しており、とくに地震発生後 25 分～30 分の人的被害率に顕著な差がみられた。これは、避難開始時間と津波が陸域に氾濫し始める時間がほぼ同時刻であったためである(図-4)。また、人的被害率の平面分布(図-6 (a) および図-7(a))から、海岸近くの区域では被害率が高く、避難開始以前あるいは開始直後に最も被害を受けたためと考えられる。なお、地震発生直後から 10 分までに住民が避難を開始した場合には、被害は発生しなかった。

4.2 現況における人的被害規模

津波防災施設の整備された現況において、地震が発生してから 15 分以内に避難を開始した場合は、陸閘・水門の開閉状況にかかわらず、全ての住民が被害を受けずに避難完了した。また、避難開始時間が 20 分後の場合は、開放時で人的被害率が 0.4%，閉鎖時で 0.3%であった。さらに、25 分後の場合は、開放時で 6.2%，閉鎖時で 5.7%となり、被害対象地域である宇佐地区の人口が 6079 人(平成 7 年国勢調査)ということをもとにすると、被害者数は開放時で 377 人、閉鎖時で 347 人と求められる。これらのことから、住民の避難開始時間が遅れた場合に、陸閘・水門の閉鎖による人的被害軽減効果がとくに高くなることが示された。このため、現況では陸閘・水門を閉鎖しておかなければ、逃げ遅れた住民が被害を受ける危険度が高くなると指摘される。ここで、陸閘・水門が開放されていた場合には、萩谷川河口部付近の区域で人的被害率が高くなるとは思われたが、開閉状況による有意な差はほとんどみられなかった。これは、河口部において津波の氾濫が始まるまでに住民が避難を完了していたためであった。



(a) 安政再現時



(b) 現況

図-5 人的被害率の時間的な推移

4.3 人的被害規模の変化

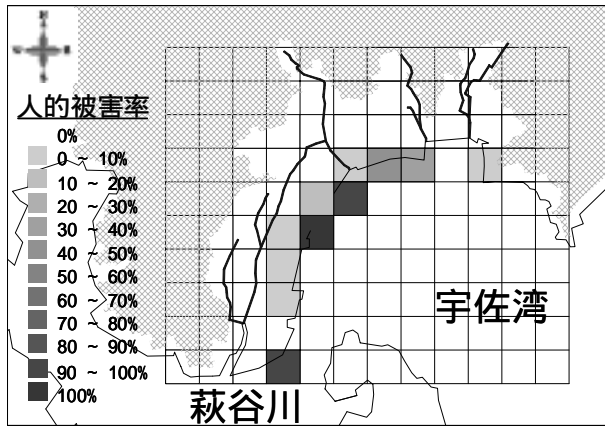
安政再現時と現況を比較すると、津波防災施設が整備されたことにより宇佐地区の人的被害率は100～10分の1にまで低減された。しかしながら、現況において地震発生から 25 分後に避難を開始した場合には、安政再現時の 20 分後に避難を開始した場合よりも人的被害率が大きいことが示された。このため、防波堤や防潮堤などの防災施設が整備された現況においても、住民の迅速な避難が求められる。

人的被害率の分布は、安政再現時において宇佐地区のちょうど中央にあたる海岸付近および萩谷川左岸部の区域で高い値となった(図-6 (a), 図-7 (a))。一方、現況においては、被害範囲が小さくなったが、安政再現時と同様な傾向がみられた。これは、現況においても安政再現時と同じ区域が危険であることを示している。

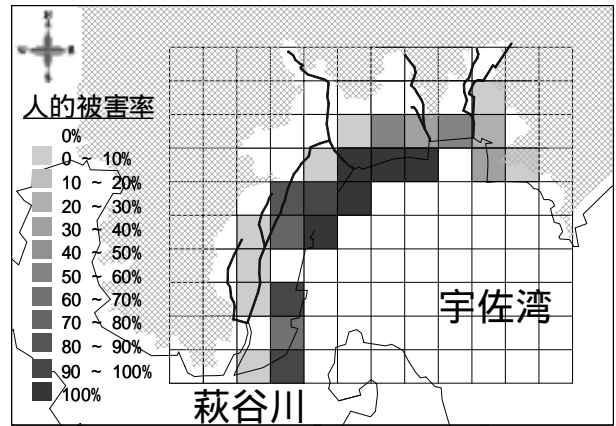
図-8に、宇佐地区における区域ごとの家屋数の分布を示した。宇佐地区において最も住宅の密集している区域は、人的被害率の高い区域と一致している。本結果では、人口の分布状況が不明な安政再現時と比較するために、人的被害率の分布から危険区域の判定を行っており、人的被害者数については考慮していない。しかしながら、これを考慮した場合、人的

被害率が高く住宅密集地である区域は最も被害者の大きくなる区域であるといえる。

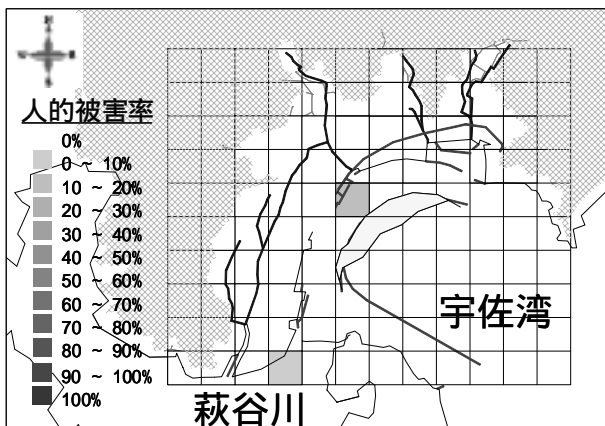
本手法により算出された人的被害率は、地震被害を全く考慮していない。そのため、家屋などの倒壊により避難路が遮断された場合には、本結果以上に人的被害は拡大するものと予想される。



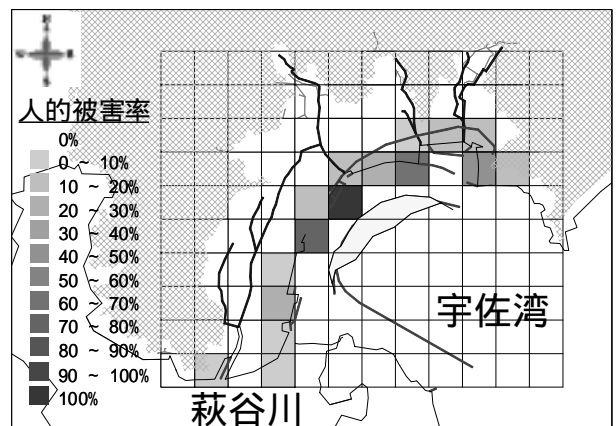
(a) 安政再現時



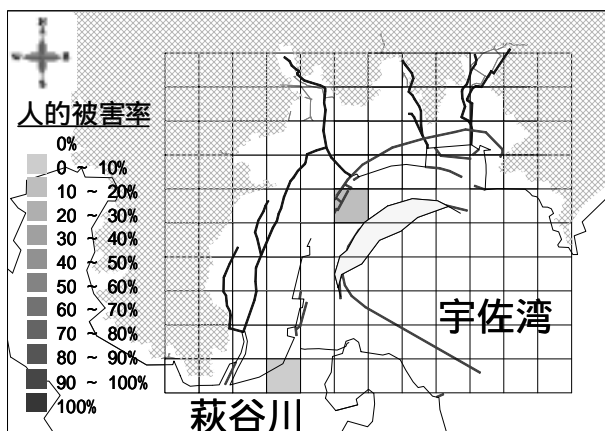
(a) 安政再現時



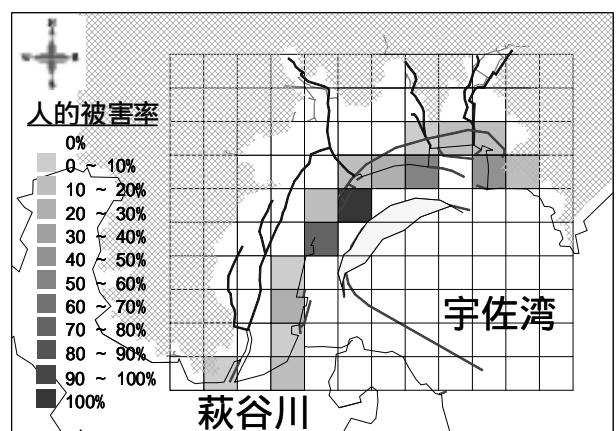
(b) 現況 開放時



(b) 現況 開放時



(c) 現況 閉鎖時



(c) 現況 閉鎖時

図-6 地震発生後20分に避難開始した場合の人的被害率の平面分布

図-7 地震発生後25分に避難開始した場合の人的被害率の平面分布

5. おわりに

本研究では、津波防災施設の変遷が津波による人的被害発生規模に及ぼす影響を把握するため、安政南海地震当時と現況での津波の挙動および人的被害について比較・検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 現況では、防波堤や防潮壁などの津波防災施設が整備されたことにより、浸水範囲および浸水高は低減されることが確認できた。しかしながら、陸開・水門が開放されていた場合には、閉鎖時に比べて浸水範囲が約 1 割増大することを明らかにした。さらに、防潮堤や防潮壁は津波の流入を低減する一方で、堤内地に溜まった海水の排除の妨げにもなりうることを示された。
- 2) 津波防災施設の整備により、宇佐地区では人的被害率が 100 ~ 10 分の 1 にまで低減された。しかしながら、現況において地震発生から 25 分後に住民が一斉に避難開始した場合には、安政再現時の 20 分後に避難開始した場合よりも人的被害が大きく、住民の迅速な避難が重要であることを指摘した。また、現況においても未だ安政再現時と同じ区域の危険度が高いことを明らかにした。

以上の結果を得たが、人的被害予測については、陸上に氾濫した津波の挙動を精度よく表現すること、地震被害による避難行動への影響など、予測精度をあげるための今後の課題も多い。とくに、防潮堤や防潮壁などを横切って配置される小河川や水路では、津波が越波するよりも早い時間に浸水し始めることが考えられ、より詳細な人的被害発生メカニズムの解明のためにも、これらを考慮していく必要がある。

謝辞

最後に、本研究は平成 14 年度科学研究費基盤研究(C)(代表者:村上仁士)による研究費の補助を受けたものであることを明記し謝意を表す。

参考文献

- 今村明恒(1938):土佐における宝永安政津波の兩度津浪の高さ,地震,第 10 卷,pp.394-404
- 杉本卓司・村上仁士・島田富美男・上月康則・倉田健悟・志方建仁(2002):津波に対する水門・陸開の有効活用とその効果に関する考察,海岸工学講演会論文集,第 49 卷,pp.306-310.
- 島田富美男・村上仁士・上月康則・杉本卓司・西川幸治(1999):津波による人的被害予測に関する一考察,海岸工学講演会論文集,第 46 卷,pp.361-365.
- 村上仁士・伊藤禎彦・山本尚明(1996):各種断層モデルによる四国沿岸域の津波シミュレーションに関する考察,徳島大工学部研究報告,第 41 号,pp.166-167.
- 村上仁士・島田富美男・伊藤禎彦・山本尚明・石塚淳一(1996):四国における歴史津波(1605 慶長・1707 宝永・1854 安政)の津波高の再検討,自然災害科学,第 15 卷,pp.43-64. 版 416-1995],東京大学出版会,493 pp.