

地震による大規模避難の実例調査と 津波からの住民避難シミュレーションの検証

後藤 洋三¹・印南 潤二²・Muzailin AFFAN³・Nur FADLI³

¹正会員 東京大学附属地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail: gotoyozo@mti.biglobe.ne.jp

²株式会社ベクトル総研 (〒150-0001 東京都渋谷区神宮前6-19-16 越一ビル6階)

E-mail: innami@vri.co.jp

³Syiah Kuala University (Banda Aceh, Aceh Province, INDONESIA)

E-mails: muzailin2000@yahoo

ivad29@yahoo.com

2012年4月11日に発生したスマトラ北部西方沖の地震 (M8.6) の際に約400km離れたスマトラ島アチェ州の州都バンダアチェ市で大規模な避難騒動が発生した。幸い1mを超えるような津波は到達しなかったが、2004年12月のインド洋大津波で住民の1/4が亡くなった同市では、海岸地域の住民10万人以上が津波を恐れて内陸に避難し、各所で大渋滞が発生した。そこで著者らは、住民のおよそ1%にあたる1065名にインタビューして避難の実態を調査し同市の防災対策に役立つ事項を提言した。また、著者らは2009年より同市の防災教育・都市計画のために、住民が津波から避難するシミュレーションを作成してきており、そのシミュレーションを大規模避難の実データで検証した。その結果、目的地の選択、避難経路の選択等のモデルに改良すべき点があるもののシミュレーションは実現象を再現できていることを確認した。

Key Words : evacuation, tsunami, simulation, agent model, Banda Aceh

1. 2012年4月11日スマトラ北部西方沖の地震

バンダアチェはスマトラ島北西端のアチェ州の州都で、現在の人口は約22.3万人 (2010年国勢調査データ)、2004年12月28日のインド洋大津波では人口の約1/4が犠牲となり、市域の半分が壊滅する被害に見舞われた¹⁾。生き残った人々の努力とインドネシア内外の手厚い支援に

より、外見的には復旧のフェーズは終了して人口もほぼ震災前のレベルに回復しているが、住民の津波に対する恐怖心・警戒心は依然根強い。

そのような中、2012年4月11日15時38分にバンダアチェから約400km離れたスマトラ島北部西方沖の海底約23kmでMw8.6の地震が発生した。気象庁に相当するBMKG (Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics)は地震発生4分54秒後に津波警報を発令²⁾、更にその地震から2時間後の17時43分に南隣でMw8.2の地震が発生し、津波警報は継続して発令された。幸い二つの地震とも横ずれが主体で、観測された最大の津波はインド洋岸のMeulaboh市で1.06m、一部地域の水産施設に軽微な被害がでた程度で終息し、警報は20時6分に解除された。揺れによる被害も脆弱な施設に影響が有った程度で、バンダアチェの揺れは震度5弱程度であったと推定される。

2. 津波警報の伝達状況と住民の行動の概況

BMKG の津波警報はメディアに伝達され、インドネシア国内の7つのTV局は地震発生後6~12分で特番やテ

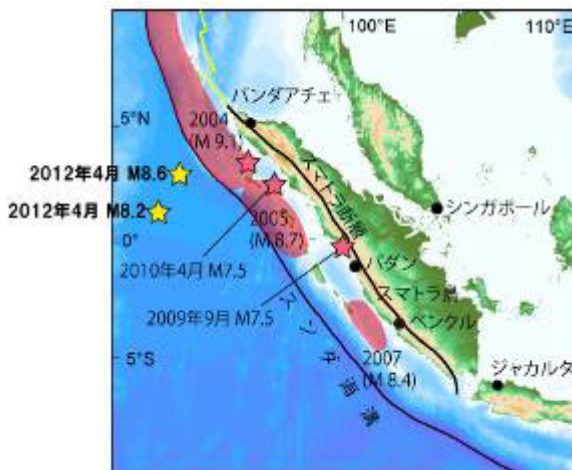


図-1 スマトラ島と震源位置 (地震研究所HPより)

ロップで警報の発令を放送した。バンダアチェでは地震直後の停電を免れた地域があり、全住民の 7%程度がこの情報を得た。一方、比較的リスナーが多いとされるコミュニティFM ラジオ局 (RAPI: 無線協会) には BMKG の警報が伝えられる仕組みがなかった。一方、バンダアチェ市内と周辺地域に津波警報サイレンが 6 基設置されていたが、何らかの理由で遠隔作動せず、そのうちの 2 基に技術者が出向いて地震から 40 分後と 1 時間後に手動で作動させた²⁾。

津波警報が伝えられない中でも住民の大部分は揺れから津波の来襲を恐れ避難を始めた。バンダアチェは標高の低い平坦な土地に発達しているため、津波避難には内陸に向かうか堅牢な建物の上層階に逃げ込むしかない。10万人を遙かに超える住民が内陸に避難しようとし、その7割はバイクを使用して市内各所で渋滞が発生した。さらに、遅れて鳴ったサイレンが実際に津波が到来した警鐘と誤解されたり、2回目の地震が発生したことにより、混乱は翌朝まで続いた。死者は6名と報告されているが死因には高齢者の心臓麻痺が含まれている。



写真-1 避難する住民 (Serambi ニュース社提供)

3. 住民の避難行動の実態調査

著者らは、今後の防災対策に生かす教訓を得るために、また著者らが開発してきた津波から住民が避難するシミュレーション³⁾の検証を行うため、この地震によるバンダアチェ市民の避難行動を調査した。

地元の Syiah Kuala 大学の研究者と学生 11 名が現地調査チームを結成し、4月24日～5月9日と7月4日～9日の2期にわたって調査対象地域 (2004年の大津波の被害が大きかった地域) を戸別訪問して住民の約1%にあたる 1,065 名にインタビューを行った。

調査に当たっては、チームのメンバーは表-1に示す34項目の質問事項を記載したアンケート票を持参し住民から聞き取った答えを自ら書き込む、いわゆる半構造化インタビューを行った。インタビューする住民のサンプリングに特別な手法を適用することは困難であったので、調査対象地域 (後述の図-5参照) 内の地区 (Village) ご

とに目標数を定め、年齢や性別については各調査員が偏りがないように選定することとした。

インタビューに合わせて、避難した人の避難ルートを聞き取り、記録した。

表-1 インタビュー項目

1	名前
2	年齢、性別
3	住所
4	主な職業は(12項目から選択; 以下12択と記す)
5	修学歴
6	地震の時どこに居たか (9択)
7	地震が起きたとき津波が来ると思ったか (4択)
8	津波サイレンを聞いたか(3択)
9	BMKGが津波警報を発令したのを知っていたか(4択)
10	津波警報を解除されたのを直ぐ知ったか (3択)
11	どこから警報の発令を聞いたか (14択、複数回答)
12	BMKGの発令する津波警報を信用するか (6択)
13	避難したか、どこへ避難したか (9 択)
14	地震から何分後に避難を始めたか (6択)
15	避難する時どのような交通手段を使ったか (5択)
16	避難中に渋滞に遭ったか (3択)
17	渋滞に遭ってどれ位時間をロスしたか (6択)
18	避難した場合、当初の目的地に行けたか (6択)
19	避難中にどこかに立ち寄ったか (5択)
20	立ち寄った所でどれくらいの時間居たか (7択)
21	目的地に着くのどれ位時間がかかったか(7択)
22	避難することにした最大理由は (8択)
23	避難するまでに何をしたか (12択、複数回答)
24	誰と避難したか (7択、複数回答)
25	避難していない人に声を掛けたか (3択)
26	いつ家に戻ったか (4択)
27	帰宅する際BMKGの警報解除を参考にしたか (4択)
28	何故避難しなかったのか(11択)
29	地震から津波が来るまでの時間は (7択)
30	あなたか家族が2004年の大津波を経験したか(2択)
31	津波について家族と話し合っていたか (5択)
32	あなたが習ってきた津波の知識は役立ったか (6択)
33	津波避難訓練に参加したことがあるか (4択)
34	地域の津波訓練は4. 11の避難に役立ったか (4択)

4. 実態調査の結果と考察

以下では、バンダアチェでの調査結果を、著者の一人が参加した東日本大震災津波避難合同調査団 (山田町・石巻市担当チーム) の調査結果⁴⁾と可能な範囲で比較しながら考察する。

(1) ヒヤリング回答者の年令分布

表-2に地域別の人口と聞き取り数を示す。目標通りの1%に達していない地域もあるが、対象とした地域でほぼ分散したサンプリングが行えた。

表-2 地区別のインタビュー数

行政地域名	人口	インタビュー数	サンプル率
Meuraxa	16,484	174	1.06
Kuta Raja	10,433	94	0.90
Kuta Alam	42,217	349	0.83
Syiah Kuala	34,850	248	0.71
その他地域	—	200	—

被インタビュー者の年齢分布とバンダアチェ全人口の年齢分布を図-2と図-3に示す(18歳以下は除外)。被インタビュー者の分布が30代、40代にやや厚い傾向が見られるが、大きな乖離はない。我が国より若年層が大変多く、インドネシア全体と比較しても多い傾向にあるが、バンダアチェは学生の多い町である事に加え、2004年の大津波で高齢層が減少し、逆に復旧事業で若年層が流入したためと推定される。

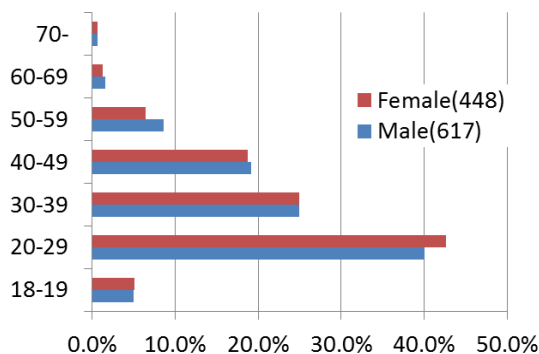


図-2 被インタビュー者の年齢分布

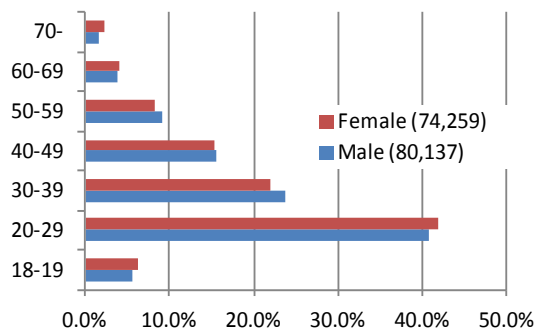


図-3 バンダアチェの年齢分布(同市統計局資料⁵⁾より)

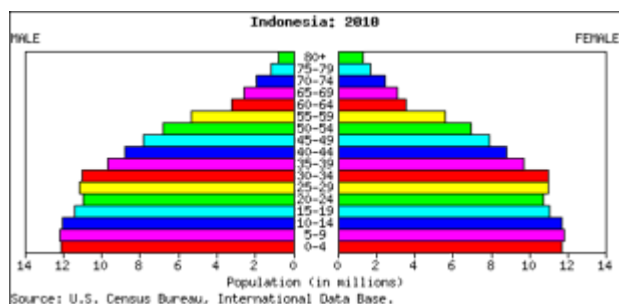


図-4 インドネシアの人口分布 (US Census Bureau)

(2) ゾーン区分とヒヤリング回答者の職業

対象地域を海岸からの距離に着目して図-5に示す5つのゾーンに区分し、インタビュー結果を整理した。まず、職業を整理した結果が表-3である。海岸に近いゾーンAとBには漁民多くゾーンCの中心地域は商業、周辺地域はオフィス勤務者が多く見られる。ゾーンDは一般的な住宅街であり、ゾーンEの北東地域は学生や大学関係者が多い。

修学歴を聞き取り調査したところ、大卒以上19.8%、高卒・専門学校卒以上が79.5%、中卒以上が92.5%、小卒以上が100%であった。

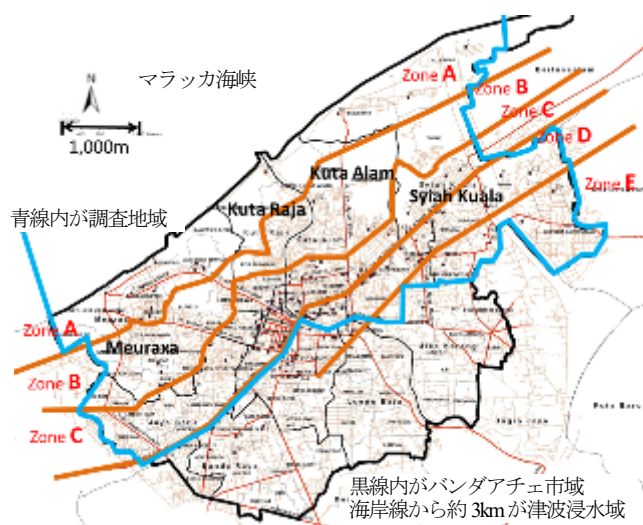


図-5 調査地域とゾーン区分

表-3 ゾーン別の職業

ゾーン	A	B	C	D	E
漁師	9.6%	10.6%	5.1%	1.6%	0%
船持漁師	8.7%	4.5%	1.3%	0%	0%
農民	0%	.5%	.5%	.8%	0%
工場主	0%	0%	.3%	0%	0%
商店主	6.7%	4.7%	13.1%	3.1%	13.9%
サービス業	0%	1.5%	2.8%	1.6%	0%
建設業	1.9%	.5%	1.3%	1.6%	0%
公務員	6.7%	10.9%	13.6%	19.4%	19.4%
会社員	9.6%	8.9%	13.3%	21.7%	11.1%
主婦	20.2%	22.3%	14.4%	11.6%	2.8%
学生	22.1%	21.8%	23.8%	27.9%	44.4%
無職	4.8%	4.0%	5.4%	6.2%	5.6%
その他	9.6	9.9%	5.3%	4.7%	2.8%
総数	104	404	390	129	36

(3) 避難を始めるきっかけ

表-4がどのような理由で避難を始めたかを聞き取った結果である。大きな揺れを感じたからが最も多いが、次いで隣人が避難するのを見たからが多い。一方、津波サイレンを聞いたからが12%ある。津波サイレンが鳴ったのは地震発生から40分後と1時間後であり、騒然とし

た中では遠くまで届かない音量なので（これまで行われた避難訓練で聞こえにくいと言う苦情が出ていた）、このデータには疑問が残る。津波サイレンより早い時間帯に救急車などのサイレンを誤聞した可能性がある。

合同調査団（山田町・石巻市担当チーム）の調査結果では、大きな揺れを感じたからが最も多いのは同じであるが、防災無線による警報を聞いたからが次に多い。バンダアチェでは公的な情報提供が乏しいため、周囲の人達の動きを見て判断することになるのであろう。

表-4 避難を決めたきっかけ

	男性	女性
強い揺れを感じたから	43%	45%
津波サイレンを聞いたから	11%	13%
津波警報が発令されたと聞いたから	7%	6%
近隣の大勢の人が避難するのを見たから	28%	29%
家族が避難しようと言ったから	8%	5%
近隣の人やリーダーから避難するよう言われた	0%	1%
市の防災関係者から避難するよう言われた	0%	0%
その他	3%	2%
総数	422	368

表-5 山田町と石巻市での調査結果

	山田	石巻
強い揺れを感じたから	54%	29%
防災無線で警報を聞いたから	10%	24%
隣人やコミュニティーリーダーに従った	9%	15%

(4) 津波警報の覚知

揺れを感じて避難をはじめた人でも避難中に警報が発令されたことを知った人が多い。表-6は津波警報の発令をどこから聞いたかを示している。約半数の人が口伝で聞いているが、その情報源が確かなものであったかどうか懸念される。

津波サイレンが鳴ったので、と言う答えが多いが、避難中に聞いたと言うことであろう。一方、数は少ないがゾーンAで5%の人が地域のコミュニティーリーダーから聞

表-6 津波警報が出されたことを最初にどこから知ったか

	A	B	C	D	A～D
テレビから	3%	6%	8%	9%	7%
ラジオから	3%	2%	3%	4%	3%
モスクの拡声器	0%	1%	2%	1%	1%
パトカーの拡声器	1%	1%	2%	3%	2%
津波サイレン	35%	17%	13%	21%	18%
市職員から	0%	0%	0%	2%	0%
地域のリーダーから	5%	0%	0%	0%	1%
電話、SMS など	15%	12%	14%	13%	13%
家族・近隣の叫声	35%	55%	50%	43%	49%
その他	4%	5%	8%	3%	6%
総数	104	406	389	129	1028

いたと答えている。ゾーンAの一部では自主的な防災組織が形成されているのかもしれない。

TVから情報を得た人が7%いる。図-6はTVから情報を得たという人が10%以上いた地域を赤丸で囲っている。市の中心部に集まっており、この地域は地震の直後に停電しなかったと推定できる。しかし、通電し続けることにより被害が拡大することを避けるため、電力会社は地震発生から19分後に通電を止めた。そのため、TVで津波警報を見ることが出来たのは10分間ほどであった。省略するがTVで情報を見た人ほど、速やかに避難した傾向が見られた。

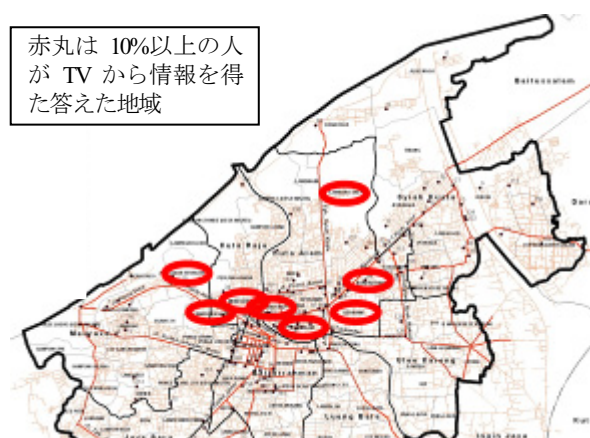


図-6 地震直後に停電しなかった地域

(5) 避難実施率と避難開始時間

表-7はゾーン別、性別の避難実施率を示している。海岸近くのゾーンAは90%以上の人達が避難行動を取っているが、内陸の特に男性の避難率は70%以下になっている。ゾーンB, C, Dの男性では様子を見ていたと推定される人が20%以上に達している。津波が見えてからでもバイクがあれば逃げられるという2004年の経験が影響している可能性がある。ゾーンEはサンプル数が少ないため省略する。

図-7は避難を開始した時間である。大部分の人は10分以内に避難を開始しており、女性より男性がやや遅い。

表-7.1 避難したか（男性）

	A	B	C	D
内陸に逃げた	66%	58%	46%	39%
高いビルに逃げた	10%	3%	4%	6%
モスクに逃げた	16%	7%	15%	10%
逃げたの合計	92%	68%	65%	55%
自宅の2階に逃げた	0%	2%	3%	2%
居合わせたビルの上階へ	0%	1%	3%	2%
安全な場所にいた	0%	7%	10%	13%
居た場所から動かず	2%	8%	7%	3%
外に出たが逃げなかった	7%	14%	11%	25%
総数	58	238	232	67

表-7.2 避難したか（女性）

	A	B	C	D
内陸に逃げた	59%	79%	60%	68%
高いビルに逃げた	20%	3%	2%	8%
モスクに逃げた	13%	4%	16%	8%
逃げたの合計	92%	86%	78%	84%
自宅の2階に逃げた	0%	2%	1%	2%
居合わせたビルの上階へ	0%	1%	2%	7%
安全な場所にいた	0%	2%	5%	3%
居た場所から動かず	2%	4%	2%	0%
外に出たが逃げなかった	7%	7%	13%	5%
総数	46	168	158	62

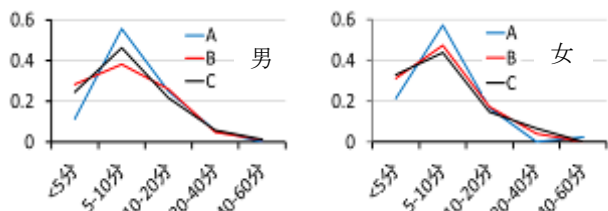


図-7 避難開始までの所要時間

合同調査団（山田町・石巻市担当チーム）の調査結果では、66～67%が地震後速やかに避難を始めているが、津波に対する警戒心が高かった山田町でも防潮堤があったり少し小高いところにいる人の避難は緩慢になっていた。8年前に大災害を経験したバンダアチェでも、男性に津波に対する警戒心が薄れる傾向が現れている。

(6) 避難の形態（誰と避難したか）

表-8 は誰と避難したかで、家族と一緒にA,B,Cで過半を占めるが、DとEのゾーンでは家族と一緒に低下し、職場や学友と一緒にが増える。一方、海岸部のゾーンAでは隣人と共に20%近くを占め、津波の危険性が高いA地域では隣人や家族との絆に頼る傾向が見える。これは我が国で推奨されることが多い「津波てんでんこ」とは逆の傾向である。

合同調査団（山田町・石巻市担当チーム）の調査結果では、家族と共に避難が山田町・石巻市共に半数を占めているが、危機意識が高かったと思われる山田町では一人で避難が30%に達していた（石巻市の場合は19%）。

表-8 誰と避難したか（複数回答）

	A	B	C	D	E
一人で避難	15%	12%	13%	25%	16%
家族と避難	52%	64%	57%	43%	40%
職場の同僚と避難	8%	9%	11%	15%	8%
近所の人と避難	19%	9%	11%	7%	0%
学友と避難	5%	4%	6%	9%	28%
その他	1%	2%	1%	0%	8%
総数	117	329	286	97	25

(7) 避難に使われた交通手段

表-9 は避難の手段をゾーン別に示している。全体では73%の人がバイクを使用しているが、ゾーンAとゾーンCでは徒歩避難が比較的多い。これは近所に大きなビルやモスクがあり、そこを避難先と選択した人が徒歩避難したためと推察される。また、ゾーンCでは車避難がやや多い。車は裕福な人や職業上で必要な人しか持てないので、ゾーンCはそのような人が多いと推察される。

表-9 避難に使われた交通手段

	A	B	C	D	E
徒歩	16%	5%	18%	17%	12%
自転車	3%	2%	2%	1%	0%
バイク	68%	84%	63%	71%	80%
自動車	13%	9%	18%	11%	8%
総数	94	310	272	90	25

交通手段と避難開始時間を図-8 に示した。バイクと自動車の避難開始時間に有意な差は無いが、歩行避難の場合の開始時間が遅い。何らかの理由で避難開始が遅れ、既に渋滞が始まっているためバイクや車の避難は諦め徒歩で近所のモスクや大きな建物に向かったと推測される。

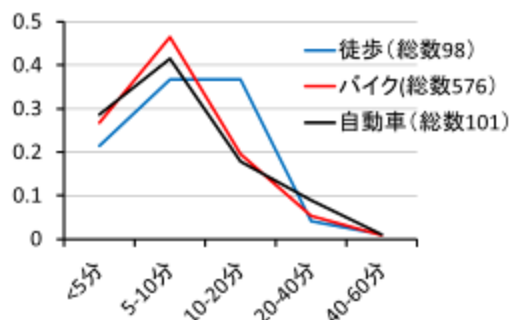


図-8 交通手段と避難開始時間

合同調査団（山田町・石巻市担当チーム）の調査では山田町の徒歩避難が54%、自動車避難が36%、石巻市の徒歩避難が44%、自動車避難が51% である。

それに対し、バンダアチェでは徒歩避難が少なくバイク避難が圧倒的に多い。バンダアチェは平坦地に広がっていて中心部から内陸に向けて数km以上は歩かないと安心できる場所に到達できないこと、鉛直避難場所として信頼される建物が少ないこと、自動車は普及していないが一家に1.8台のバイクが所有されていること（著者らによる2010年調査、194サンプル）、そして1台のバイクに4名ほど乗る場合もある事、等による

(8) 避難所要時間

図-9 は目的地までの避難所要時間をゾーン毎にプロットしたものである。最も海岸に近いゾーンAからの避難が短時間で終了している割合が多い。これは、近くの避難先を選んだ人が多いと、危機感が高いため早く避難を始めて渋滞を免れた人が多いことによると思われる。DがAに次いで短時間で終了する割合が多いのは、比較的避難しやすい位置関係にあるためと思われる。

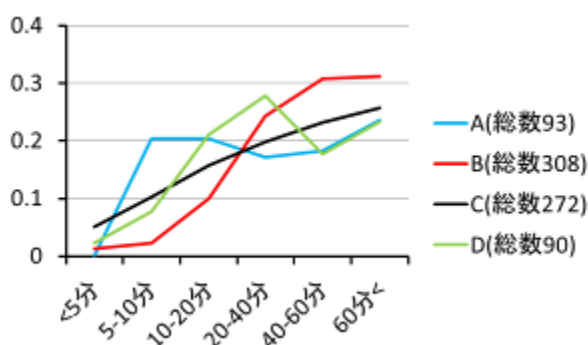


図-9 ゾーン別の避難所要時間

図-10 は目的地と避難所要時間の関係である。モスクや大きな建物を選んだ人と内陸へ向かった人との間に明瞭な差がある。図-11は交通手段と所要時間である。徒歩の場合は近くに目的地を定め渋滞の影響も受けなため所要時間が短くなる。表-10 は交通手段別に見た渋滞の遭遇率である。バイクと車の避難者の85%以上が渋滞に遭遇している。

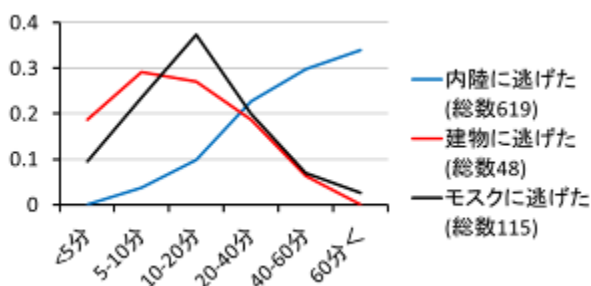


図-10 避難先と所要時間

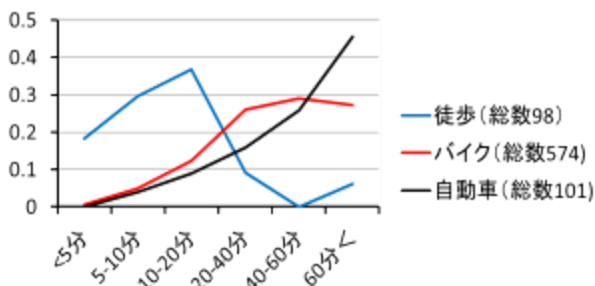


図-11 交通手段と所要時間

表-10 交通手段と渋滞

	徒歩	自転車	バイク	自動車
渋滞に巻き込まれた	15%	80%	88%	95%
渋滞を見たが巻き込まれなかった	38%	0%	9%	5%
渋滞を見なかった	47%	20%	3%	0%
総数	98	15	576	101

すなわち、バイクや自動車避難者は避難先により安心感のある内陸を選び、大部分が渋滞に遭遇して通常の数倍以上の時間を避難に要している。

合同調査団（山田町・石巻市担当チーム）の調査結果では、自動車で避難した人の山田町で11%、石巻市で45%が渋滞に巻き込まれているが、バンダアチェの渋滞はそれらより遙かに激しかったと言えよう。

(7) 一時帰宅あるいは学校への迎え

表-11 が避難を始めるまでに何をしていたかを示している。外出先から自宅に戻って避難を始める人が6%程度、子供を学校に迎えに行ってから避難を始める人が7%程度いた。ゾーンDで外出先からの帰宅が多いのは職住が分離した住宅街だからであろう。

合同調査団（山田町・石巻市担当チーム）の調査結果では出先から自宅に戻ったが23%と20%、学校などに家族を迎えに行ったが6%と12%である。我が国と比べて散らかった家財を整頓が少ないのはそれだけ警戒心が高いことと、揺れがそれほど大きくなかったことが影響していると思われる。

一方、最も危険度が高いゾーンAで家族の避難準備を助けたり周囲に声を掛ける割合が高いことが注目される。

男女の役割を比較すると男性が家族の迎えで学校などに行き女性が避難のための荷物を準備したり家の戸締まりをする傾向が見える。

表-11 避難を始めるまでに何をしていたか（複数回答）

	A～Dの		A	B	C	D
	男	女				
何もせずに直ぐ避難	25%	24%	28%	23%	26%	21%
外出先から帰宅	9%	3%	6%	4%	7%	13%
家族の避難準備を支援	10%	8%	11%	9%	9%	7%
家族を迎えに学校へ	9%	5%	5%	7%	7%	10%
海の様子を見に行く	1%	0%	0%	0%	0%	1%
荷物をまとめる	9%	16%	4%	15%	13%	10%
散らかった家財を整頓	1%	1%	2%	1%	0%	2%
家の戸締まりをする	22%	29%	26%	28%	23%	22%
事務所を閉める	5%	5%	5%	4%	6%	3%
メール等で家族に連絡	8%	6%	9%	8%	6%	10%
周囲に呼びかけ手助け	3%	3%	6%	2%	3%	1%
総数	785	679	191	622	500	151

図-12 は避難開始時間への影響を見たものである。自宅にいて直接避難を始めた人と、自宅に一度戻ってから避難を始めた人の避難開始時間を比較すると10分程度の差となる。家族を学校などに迎えに行った場合に遅れが見られないのは、そのまま避難したためと思われる。

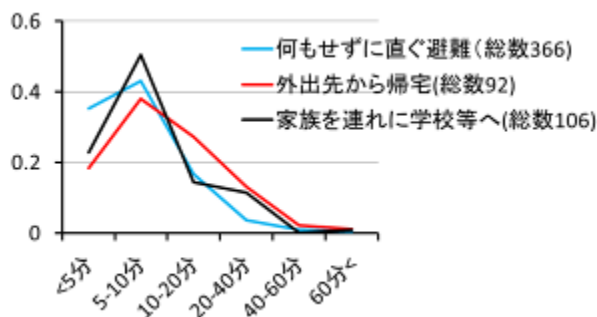


図-12 外出先からの帰宅行動などと避難開始時間

(8) 避難ルート、目的地の変更

表-12 から、海岸に近い地域ほど目的地に着くのが困難だった様子がうかがえる。ゾーンAでは想定通りのルートで目的地に着けたのは半数である。全体（Eを除く）でも想定通りに目的地に行き着いた人は59%で、28%がルートを変えるか目的地を変更している。また、目的地を決めずに避難をはじめた人が11%いた。

表-12 予定した目的地に着けたか

	A	B	C	D	A~D
目的地に予定通りのルートで着いた	51%	52%	68%	63%	59%
目的地に着いたが渋滞でルートを代えた	30%	26%	19%	14%	23%
渋滞で目的地を代えた	10%	6%	2%	6%	5%
目的地に着けなかった	1%	2%	3%	4%	2%
はっきりした目的地なしに避難を始めた	9%	14%	8%	12%	11%
総数	93	309	272	90	764

(9) 避難しなかった理由

ゾーンA,B,C,Dで26%の人が避難しなかった。表-13 はその避難しなかった理由である。津波が来ることを確認してから逃げれば良いとした人が25%もいるのは、2004年の大津波の時にバイクがあれば逃げ切れた事例があるからであろう（当時は避難者が少なく渋滞がなかった）。

東日本大震災では山田町で16%、石巻市では20%が津波が来るまで逃げなかった。その理由を表-14に示すが、バンダアチュの人達と共通するところが多い。ただし、我が国の場合は逃げなかった人の多くが高齢者であり、かつ逃げなかった人の中で亡くなった人のデータは表-14に含まれていないことを考慮しておく必要がある。

表-13 避難しなかった理由（Aはサンプル数が過小）

	A	B	C	D	A~D
自分の所まで津波は来ない		18%	34%	51%	31%
津波が来るのを確認してから		32%	25%	9%	25%
避難の準備に時間がかかった		0%	2%	5%	2%
家族を待っていた		6%	6%	0%	5%
家族を探していた		4%	0%	2%	2%
学校など家族を迎えに行った		4%	3%	0%	3%
ビルの上層階へ逃げれば良い		12%	19%	12%	15%
神の意志に任せた		10%	9%	12%	11%
その他		13%	3%	9%	8%
総数	6	99	118	43	266

表-14 山田町と石巻市の人達の逃げなかった理由

	山田町	石巻市
自分の所まで津波は来ない	42%	35%
様子を見ていた	10%	14%
避難の準備に時間がかかった	6%	4%
家族を待つか探していた	7%	5%
ビルの上層階へ逃げれば良い	3%	6%
防潮堤が防いでくれる	3%	1%
その他	29%	35%
総数	28	291

4. 津波避難シミュレーションとの比較

著者らはバンダアチュの防災教育と防災都市計画に資するため、2009年より同市を対象に津波から住民が避難するシミュレーションを開発してきた⁵⁾。そして、2012年4月には同市の沿岸地域（ゾーンA, B, C）を対象としたシミュレーションの開発を終えて、同市の関係機関と津波博物館に提供したところであった。そこで4月11日に大きな地震が勃発し大規模避難が発生したことにより、図らずもブラインドテストを行ったことになった。

以下に実避難との比較によるシミュレーションの検証を述べる。

(1) 開発した津波避難シミュレーション

著者らが開発した津波避難シミュレーションは水理モデルによる津波遡上シミュレーションとエージェントモデルによる避難シミュレーションを組み合わせたもので、その基本的な所は群馬大学の片田敏孝教授らにより開発された手法を踏襲している⁶⁾。

津波遡上シミュレーションは2004年のインド洋大津波がバンダアチュに遡上した状況を理論的に再現したもので⁷⁾、東北大学の越村俊一教授より計算結果の提供を受けいる⁷⁾。

避難シミュレーションはマルチエージェントモデルによるシミュレーションであり、接点とリンクで表現され

た道路ネットワーク上を住民をモデル化したエージェントが移動する。エージェントは、リンクの交通容量と周辺のエージェントの影響を受けながら目的地に向う。道路をネットワークで表現することにより、エージェントの可動域をメッシュで扱う方法より計算負荷が小さくなり、4.7万個のエージェントが動くシミュレーションを通常のパソコンで実施可能とした⁹⁾。

(2) エージェントと行動のルール

エージェントとしては次の4種を用いた。歩行家族エージェントと自動車エージェントは1家族を1エージェントでモデル化し、バイクエージェントは2名乗車を1エージェントでモデル化した。家族単位で避難することが多いことを考慮したもので、4.7万エージェントは10万人以上に相当する。

- a) 一般歩行家族エージェント 4km/h
- b) 老人や幼児を含む歩行家族エージェント 2km/h
- c) バイクエージェント 30km/h
- d) 自動車エージェント 40km/h

各エージェントとも前方に障害がない限り通常で移動する。道幅に余裕があると速いエージェントが遅いエージェントを追い越してできる。エージェントはそれぞれが相応の専有面積を有し、その面積が競合して前方にスペースがなくなると減速するか停止する。

自動車の場合は道幅が狭い場合も減速するが、逆に道幅が広く複数車線とれるところでは並んで走る。ただし、バンダアチェでは自動車避難の割合が小さいので、交差点やカーブでの減速を無視した簡素なモデルを使った。

エージェントが避難する目的地は以下の様に定めた。

- a) 歩行家族エージェント
最寄りの避難可能な建物か内陸の避難先
- b) バイクエージェント
大規模な建物（市内最大のモスクと津波博物館の2箇所）か内陸の避難先
- c) 自動車エージェント
最寄りの内陸の避難先

(3) 避難先と経路選択のルール

バイクと歩行家族のエージェントは目的地に向かって最短の経路を通るものとしたが、自動車エージェントは道幅によって速度が異なることから最短時間の経路を選択して通るものとした。

避難先の建物が到達前に他のエージェントで満杯になるとバイクや歩行家族のエージェントは次の最寄りの建物か内陸の避難先に向かうようにした。

避難者の心理を反映するため各エージェントにはルートの方角によって海岸方向に逃げ難いバイアスがかかるようにした。

(4) 津波のエージェントへの影響

エージェントが遡上してきた津波に捕まった場合、水深が0.5m以上で移動速度が低下し、1m以上で死亡するとした。

(5) 交差点と中央分離帯

バンダアチェの幹線道路同士の交差点はロータリーか信号機付きの交差点になっている。ロータリー交差点はネットワークでロータリーを構成した。信号は地震の際の停電で機能しないとして無視した。

バンダアチェの主要道路には小高い中央分離帯が設けられていることが多い。この中央分離帯を歩行者は超えられるが、自動車とバイクは超えられない。分離帯のある区間では、ネットワークのリンクを上り線と下り線に分けてモデル化し、随所に歩行者専用の通路を設けた。

(6) エージェントの分布と避難開始時間

対象地域の全戸を訪問し、各戸の人数と歩行困難者の有無を調査した。対象地域の住民の総数は101,245名で、今回のシミュレーションでは、それぞれが自宅から避難を開始するものとした。

歩行とバイクと自動車の比率は、2010年4月と5月の地震でアチェ州第3の都市Meulabohで起きた避難騒動を調査し、車避難17%、バイク避難66%、徒歩避難17%と定めた。そして自宅から避難を始めるエージェントに結果としてこの比率になるようにランダムに割り付けた。

避難開始までの準備時間は、Meulaboh市での調査結果を参考に、平均時間と分散を以下の様に設定した。

歩行者	5.0分	$\sigma = 1$
バイク	7.5分	$\sigma = 2.5$
自動車	8.3分	$\sigma = 1$

なお、避難準備開始のトリガーが引かれるのは、地震発生時と10分後に設定した津波サイレン起動時の2回とした。すなわち、全住民を2グループに分け、地震発生後に1グループ目が上述の準備時間を経て避難を開始し、津波サイレンが鳴ると2グループ目が同様の準備時間を経て避難を開始する設定とした。

(7) シミュレーションの条件設定と実避難の相違

シミュレーションに適用していたシナリオは4月11日の地震による実避難とは無関係に定めていたため、以下の設定が異なっている。

(a)在宅率

シミュレーションでは全家族が自宅にいて自宅から避難を始めることとしたが、4月11日の地震は昼間に起きたため在宅率は52%程度であった。ただし、6%が外出先から一旦戻って避難を始めており、外出先から直接避難した人もいるので、避難の起点が自宅でない人も含めると74%が避難している。

(b)バイク利用率

バイクを使って避難した人がシミュレーションでは66%であるが実際には73%であった。

(c)避難先

シミュレーションでは2004年の大津波の到達域から数百メートルの所に内陸の避難先を設定したが、実避難では更に数キロメートル以上内陸に向かって避難しており、渋滞は内陸部にも発生していた。

また、シミュレーションでは津波博物館に約4,000人避難することとしていたが、インタビューした1,065人の中で同博物館に避難した人はいなかった。津波博物館に避難した人の実数ははかなり少なかったと思われる。

(d)経路変更

シミュレーションでは計算時間を短縮するためエージェントが渋滞に遭遇しても経路変更しないこととしたが（避難先の建物が満杯になった場合は変更している）、実避難ではおよそ26%が避難ルートを変更している。

(8) 結果の比較

(a)全ての避難経路の重ね書き

図-13はシミュレーションから求めた全ての避難者の経路を重ねが書きしており、図-14はインタビューから明らかになった実避難者の避難経路を重ね書きしている。



図-13 シミュレーションによる全避難経路の重ね書き

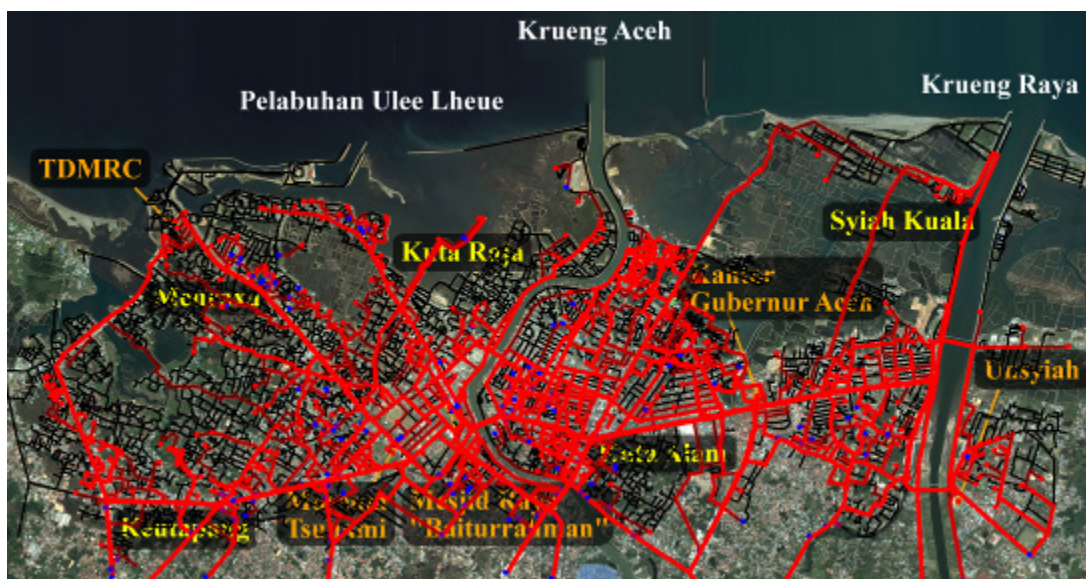


図-14 インタビュー回答者の実避難経路の重ね書き

図-13のシミュレーション結果の方が細かい図となっているが、図-13は4.7万のエージェントが避難した軌跡を重ね書きしているのに対し、図-14はインタビューできた785人の軌跡であるため個々のバラツキが浮き出た図になったためである。また、インタビューしてから図化システムへ入力する過程でデータが簡素化され、細かな枝線を通った軌跡は入力されなかった可能性がある。

また、シミュレーションでは大部分のエージェントが最短距離で内陸に向かう設定になっていたため、避難の動線は海山方向が主となって直行方向（図の左右方向）は少ない。実際の避難では職場から自宅に戻ろうとしたり、渋滞を避けようと右往左往する人がいるので直行方向の動線が発生する。この点はシミュレーションのルールの改良することにより解決できると考えられる。

(b) 渋滞個所の重ね書き

図-15 はシミュレーションから求めた地震発生から30分後の渋滞箇所（速度が1/10以下に落ちている箇所）を重ね書きしたものであり、図-16 はインタビューで証言された渋滞区間を重ね書きしたものである。

図-15 中の黄点線丸部分はシミュレーションが実際の渋滞を良く捉えている所の例である。写真-2は渋滞を起こすボトルネックの一例で、交差点の先の道路の幅が狭くなっている。

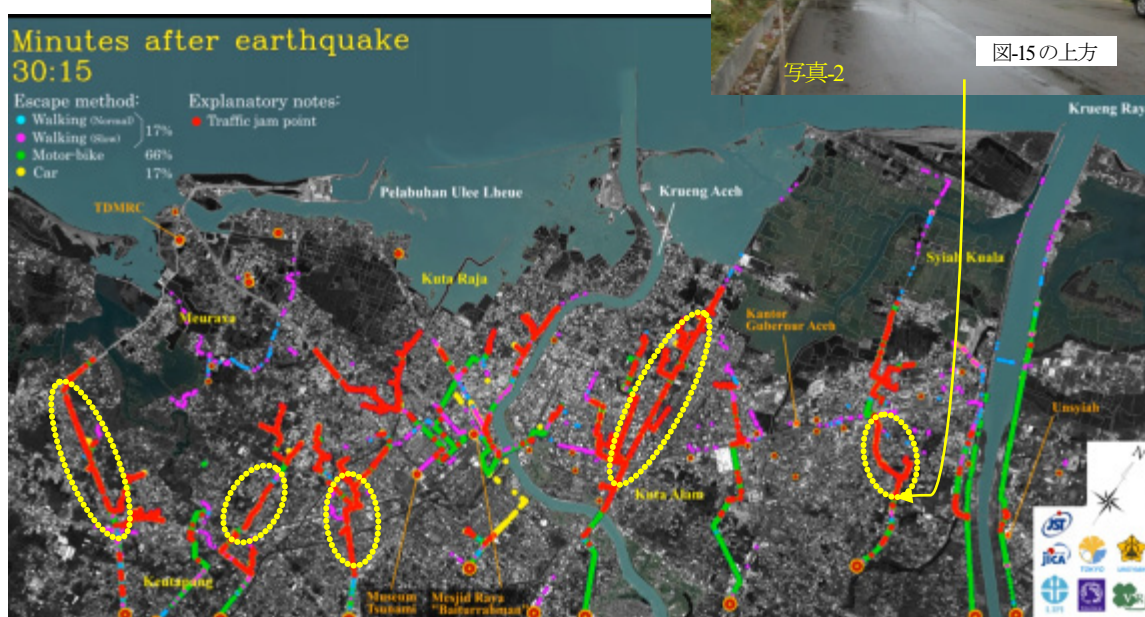


図-15 シミュレーションによる 30 分後の渋滞個所の重ね書き

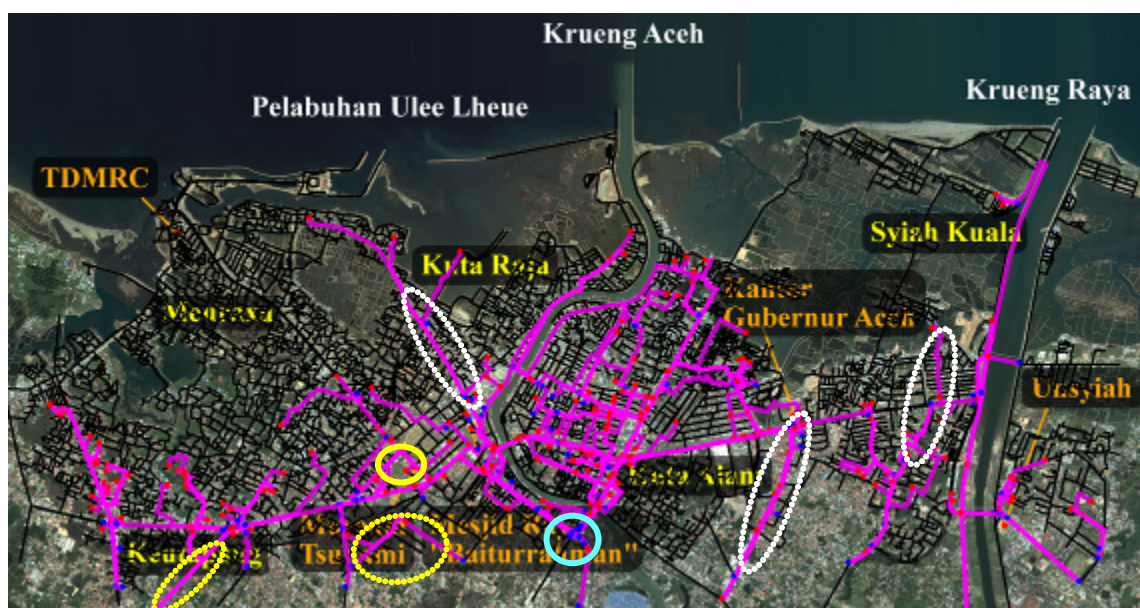


図-16 インタビュー回答者証言による渋滞個所の重ね書き

一方、相違している所もある。左右方向の動線がシミュレーションで再現され難い理由は既に述べた。ここでは図-16に示す渋滞箇所の相違点について個別に考察を述べる。

a)最短経路と通り慣れた広い経路

図-16 中の白点線丸の部分は避難先への最短ルートでないが道幅が広く地域の人にとっては日頃から通り慣れているルートである。シミュレーションでは、歩行者とバイクは最短ルートを通ることとしていた。

b)内陸の避難先への経路

黄点線丸部分は内陸側の避難経路の設定に問題がある。より内陸側まで住民が逃げることを想定してネットワークの再構築を行えば解決できる。

c)信号が消えた交差点の混雑

薄青丸はバンダアチェで日常から最も混雑する信号付きの交差点である。4月11日は停電で信号が消え混乱して通過容量が減少していたと推定される。シミュレーションでは通過容量の減少は考慮していなかった。

d)建物避難先の利用度

黄丸は津波博物館とその周辺部である。津波博物館に逃げた人が想定4000人より大幅に少なかったことは既に述べた。その差が博物館から山側の交差点の渋滞の差に現れていると思われる。

これらはシミュレーションのルールをより現実に即してチューニングすることにより解消できる。

5. 結論

(1) 津波避難対策に役立つ貴重な資料が得られた。

2012年4月11日の地震で10万人を超すバンダアチェ市民が津波来襲を恐れて必死の避難行動を取った。幸い横ずれ主体の地震であったため大きな津波は発生しなかったが、避難実験などでは得られぬ貴重な資料が得られた。

バンダアチェで見られた住民の避難行動は我が国の東日本大震災で見られた避難行動と似た特徴もある。両国の事例を比較的に分析することにより、両国の津波避難対策に資する情報が得られる。

(2) 住民は揺れで避難を決断している。

揺れを感じて多くの住民が避難していることはバンダアチェと東日本大震災で共通している。ただし、バンダアチェでは公的な情報を伝える有効な手立てがなかったために、住民は口伝情報にも頼って行動した。その点で我が国の防災情報無線システムとその運用は大変優れているが、大きな揺れを伴わない津波地震のような場合に避難を徹底するのは両国ともに大きな課題である。

(3) 住民は安心感のある内陸を第一の避難先を選ぶ。

バンダアチェの住民の大部分はバイクを使い安全な内陸奥部に逃げようとした。渋滞して内陸に行くのに40分以上かかり、近隣の建物やモスクへの徒歩避難は20分以

内であったが、それでも住民は内陸に行った。我が国で多くの避難ビルを指定、あるいは建設する動きがあるが、住民は安心感と避難猶予時間のバランスを取りながら行動することに留意する必要がある。

(4) 出先から戻ったり子供を学校に迎えに行っている。

出先からまず自宅にもどって避難を始める割合が我が国の場合より少ないが、職住近接か同一の割合が高いからであろう。子供を学校に迎えに行く行為は同じである。

避難環境が厳しい海岸に近い地域ほど近隣の人と助け合って避難する傾向が見られる。我が国の「津波てんでんこ」には沿わない行動である。

(5) 交通手段別の避難開始時間は徒歩避難が最も遅い。

意外な結果であったが、避難開始時間は自動車、バイク、徒歩の順であった。自動車利用者は速く出発しないと渋滞に遭うことが明白なため急いだのであろう。一方、徒歩による避難者は近くのモスクや建物に行く事が前提となるので時間的余裕を持ったのか、あるいは避難準備が遅れた結果徒歩を選択したためと思われる。

(6) 避難路と直行する幹線道路が避難を妨げた。

バンダアチェでは沿岸部と内陸部の間を貫通して幹線道路が走っており、その幹線道路が渋滞して沿岸部から内陸部への避難の妨げとなった。同じ状況は我が国の山田町や石巻市にも鮮明に現れている。バンダアチェ市は最も混雑する交差点を立体交差化し内陸部への道路を拡幅する計画を進めている。

(7) 避難しない理由に我が国と共通点が見られる。

やや安全とみられる地域の男性に避難しない傾向が見られる。この傾向は我が国でも同じである。津波が来るのを確認してからが多いのは2004年の大津波でバイクで逃げられた事例があるからであり、2階に逃げるが多いのも木造家屋が少なく、水流の弱いところでは2階かその屋根に上がれば津波をやり過ごせた経験があるからであろう。直近の経験を都合良く解釈する傾向は共通している。

(8) 著者等の避難シミュレーションは実避難と概ね合致した。

著者らが事前に作成していたマルチエージェントモデルによる避難シミュレーションは、実際の渋滞発生状況や避難の動きを概ね予測できていた。実際の個人の避難行動は様々でその全てをシミュレーションすることは不可能であるが、大切なことは、様々な条件下での避難現象を大きな傾向に誤りなくシミュレーションできることであり、それを分かりやすく表示できることである。その観点から、著者らが開発してきた避難シミュレーションは市民や学校生徒の防災教育と市の防災都市計画の有効なツールとなることを確認できた。

(9) シミュレーションで改良すべき点を確認できた。

a)バイク避難者にも自動車避難者と同様に最短経路より

幅の広い道路を通る傾向を取り入れる必要がある。

b)避難先選択の基準に安心感のランクを取り入れる必要がある。バンダアチェの住民にとって内陸部が最も高く次いで実績のあるモスクが高い。

c)避難先の選択と使用する交通手段の選択は避難余裕時間の関数とすべきである。

d)信号が消えて無制御状態になった大きな交差点の通過交通容量を適切に評価する必要がある。

e)海山方向の避難路と直交する幹線道路の渋滞を表現するためには、渋滞を避けようとして経路変更する行動、自宅に一度戻る行動、学校などに寄り道する行動などをシミュレーションに取り入れる必要がある。

謝辞：まず、この調査・研究のためのインタビューに応じてくれたバンダアチェ市民の皆様にご心寄りの感謝を申し上げます。また、著者らの意図を理解し、協力いただいた、バンダアチェ市の統計・都市計画局、教育局、交通局、市警察、アチェ州観光・旅行局と津波博物館、シャクアラ大学TDMRC（津波・災害減災研究センター）、Serambiニュース社の関係者に感謝申し上げます。さらに、文字通りの炎天下を地域に入りインタビューデータを積み上げてくれた現地調査チームにも感謝する。

避難シミュレーションの開発とこの現地調査は、JST - JICAのSATREPS地球規模課題対応国際科学技術協力プロジェクトの一課題「インドネシアに於ける地震火山の総合防災策」（研究代表者：東京大学地震研究所 佐竹健治&インドネシア科学院 Hery Harjono）の元で実施したものである。加えて、JICAジャカルタプロジェクト事務所の支援があつて実施できた調査であつた。

参考文献

- 1) 土木学会：スマトラ沖地震・津波被害調査報告，
http://www.jsce.or.jp/library/eq_repo/Vol2/09/report.pdf 2006
- 2) BMKG, BNPB, BPBD (Province of Aceh, Banda Aceh, West Sumatra Province and the City of Padang) : Evaluation of Tsunami Early Warning System (Initial Report with Quick Review), compiled and published by QUICK REVIEW TEAM, 2012
- 3) Goto, Y., Affan, M., Agussabti, Nurdin, Y., Yuliana D. K. and Ardiansyah : Tsunami Evacuation Simulation for Disaster Education and City Planning, JDR Vol.7 No.1 pp. 92-101, Jan. 2012
- 4) Goto, Y., Mikami, T. and Nakabayashi, I. : Fact-Finding about the Evacuation from the Unexpectedly Large Tsunami of March 11, 2011 in East Japan, Proc. of 15WCEE, DVD, 2012
- 5) Regional Planning and Development Board, Banda Aceh Municipality : BANDA ACEH IN FIGURES, 2011, The Central Bureau of Statistics and the Regional Planning and Development Board of Banda Aceh Municipality, 2011
- 6) Katada, T., Kuwasawa, N. and Yeh, H. : Development of Tsunami Comprehensive Scenario Simulator for Disaster Education and Risk Management, National Geophysical Research Institute, Hazards 2004, 2004
- 7) Oya, T., Koshimura, S. and Imamura, H. : Tsunami inundation simulation due to 2004 Indian Ocean Great Tsunami and damage analysis of the city area of Banda Aceh, Tohoku University Tsunami Engineering Technical Report Vol. 23, pp 21-23, 2006.
- 8) Affan, M., Goto, Y. and Agussabti : Tsunami Evacuation Simulation for Disaster Awareness Education and Mitigation Planning of Banda Aceh, Proc. of 15WCEE, DVD, 2012

(?????? 受付)

FIELD SURVEY OF AN ACTUAL MASS EVACUATION AND VERIFICATION OF PEOPLE EVACUATION SIMULATION FROM TSUNAMI

Yozo GOTO, Junji INNAMI, Muzailin AFFAN and Nur FADLI

A mass evacuation of the people in Banda Aceh was triggered by the Mw 8.6 earthquake of Offing west of north SUMATRA, April 11, 2012. Fortunately, there was not any serious damage by the earthquake and tsunami. But, more than one hundred thousand people in Banda Aceh, who had experienced the tragic damage by the Indian Ocean Tsunami of 2004, tried to evacuate towards inland, and they encountered very heavy traffic jam. Therefore, the authors surveyed the evacuation feature by interviewing 1,065 people in Banda Aceh and analysed people's actual evacuation performance in order to extract the lessons for better operation, through making comparisons with the evacuation of the East Japan Great Earthquake and Tsunami disaster case.

The authors also had been developing a tsunami inundation and people evacuation simulation from 2009 in order to support the disaster education and disaster mitigation city planning of Banda Aceh. The authors verified the applicability of their simulation by comparing both the actual evacuation and simulated evacuation. The simulation was confirmed to be useful and some keys for its improvement were found.