

1.5 発展途上国における持続的な津波対策に関する研究（2）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：水災害研究グループ（防災）

研究担当者：三宅且仁、野呂智之

【要旨】

本研究では、防災チームは研究対象とする都市において津波・高潮外力の被害想定を行うための災害リスク評価を平成 19 年度～平成 21 年度に行った。

初年度の平成 19 年度に既往の災害履歴・地域特性を基に津波災害における研究対象都市としてインドネシア国バリ島、高潮災害における研究対象都市としてバングラデシュ国チッタゴンをそれぞれ選定した。平成 20 年度にバリ島（津波）、平成 21 年度にチッタゴン（高潮）について、それぞれ過去の災害事例をもとに設定した外力に基づく被害想定（人的被害、建物被害）を行い、地域の土地利用状況等に応じたエリア区分毎に災害リスク評価を行い、リスクマップとしてとりまとめた。これにより、沿岸都市部の災害リスク評価に関する一連の手法を提示することができた。

キーワード：津波、高潮、災害リスク、バリ島、チッタゴン、リスクマップ

1. はじめに

本研究で防災チームが担当する項目は、特定都市において、津波・高潮外力の被害想定を行うための災害リスク評価を行うことを目的としている。既往の災害履歴・地域特性を基に、津波災害における研究対象都市としてインドネシア国バリ島、高潮災害における研究対象都市としてバングラデシュ国チッタゴンをそれぞれ選定した。各地域において過去の災害事例をもとに外力を設定し、発生させた現象に対する被害想定（人的被害、建物被害）を行い、地域の土地利用状況等に応じて区分したエリア毎に災害リスク評価を行い、最終的にリスクマップとしてとりまとめた。

2. 外力設定と浸水想定（バリ島、津波）

2.1 外力の設定

津波の外力は、インドネシア周辺の類似事例を参考に設定した。断層については、2006 年ジャワ島南部（M7.7）で発生した津波の原因となった断層と同等のものがバリ島南部にあるものと仮定した。規模については、上記事例とともに 2004 年スマトラ島地震（M8.8）を考慮した 6 ケース（M7.0、7.5、7.7、8.0、8.5、9.0）を設定し、図-1 に示す領域で浅水理論に基づくシミュレーションを行った。その際の計算条件を表-1 に示す。

図-2 はシミュレーションによる津波の水位変化（凡例の単位は m、上昇がプラス）の事例（M8.5）で、横軸お

よび縦軸は UTM 座標である。青い範囲が水位の低下を表し引き波となり、赤い範囲は反対に押し波となる。バリ島を含むインドネシア南部には始めに引き波が押し寄せ、この事例では津波の発生後 25 分程度で押し波が第 1 波としてバリ島南部に到達する。

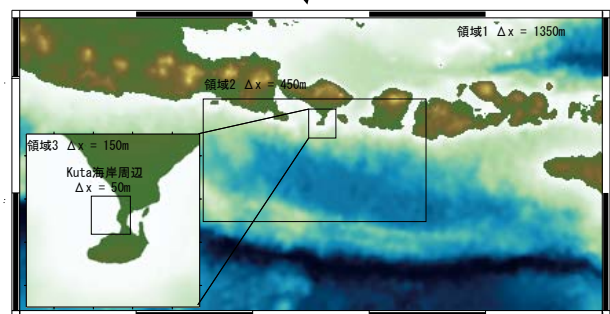
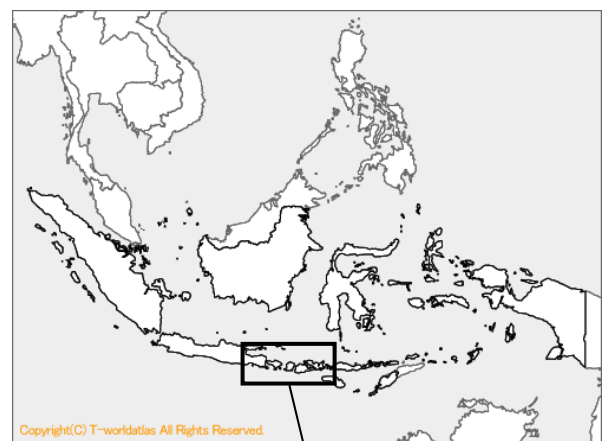


図-1 解析対象範囲

表-1 計算条件

| 項目 | 内容 | | | |
|--------|---------------------------------------|----------|----------------|---------|
| 計算格子間隔 | 1350m | 450m | 150m | 50m |
| 計算格子分割 | 1122x567 | 896x548 | 332x302 | 263x263 |
| 計算時間間隔 | 0.5s | | | |
| 基礎方程式 | 線形長波 | | 非線形長波 | |
| 計算手法 | 差分法 (時間リーブ・フログ法、空間スタッガード格子) | | | |
| 沖合境界条件 | 自由透過 | 水位・流量を接続 | | |
| 海底摩擦 | Manningの粗度係数 n=0.025 | | 衛星データによる土地利用分類 | |
| 陸側境界条件 | 完全反射 | | 遡上境界 | |
| 越流計算 | なし | | | |
| 初期条件 | Manshinha and Smylie(1971)の方法 | | | |
| 想定津波 | 1977/8/19 Sumba 島地震津波 (加藤・Sunarjo・都司) | | | |
| 潮位条件 | 0.0m | | | |
| 計算再現時間 | 地震発生から3時間 | | | |

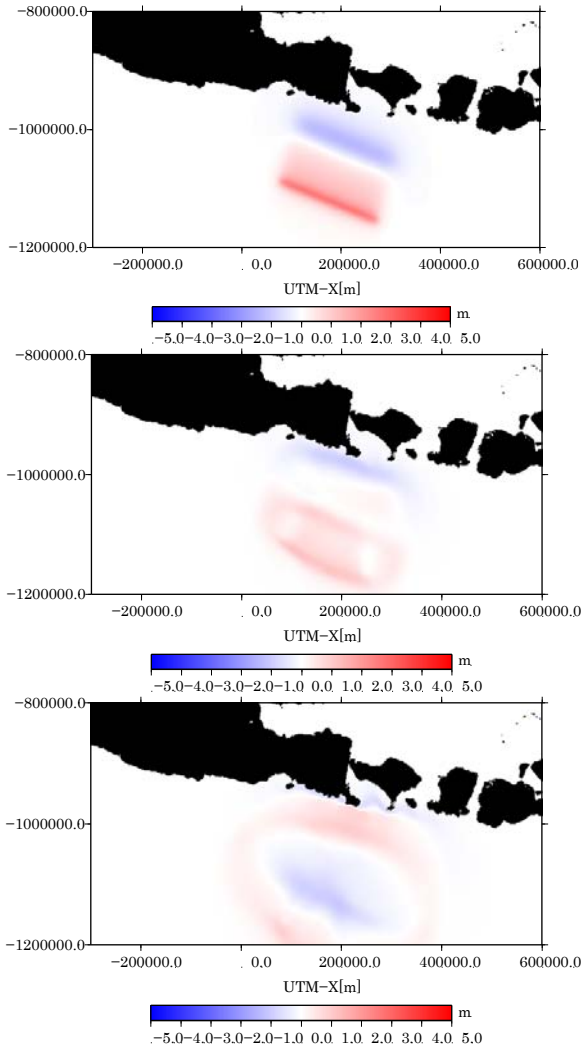


図-2 津波の水位変化

(上から順に「発生直後」「発生10分後」「発生25分後」)

2.2 浸水想定

バリ島にはクタ、サヌール、ヌサドゥアなど海外からの観光客が集まる複数の有名なビーチがあるが、空港から近く人口が最も集中しているクタ地区を対象地として選定した。2.1で行ったシミュレーション結果をもとに、

クタ地区における浸水状況を再現した。図-3はクタ地区における最大浸水深の分布を示しており、ホテルやショップ等が並ぶ海岸から1km以内では4m程度の浸水が想定される。なお、2004年スマトラ島地震を想定したM9.0のケースでは、クタ地区を含むバリ島南部のほぼ全域で2~4mの浸水が発生する結果となった。

3. 被害想定 (バリ島、津波)

3.1 被害想定シナリオの設定

被害想定は、人的被害および建物被害(家屋、ホテル、ショップ、ビーチ)を対象に行った。表-2は諸条件を整理したものである。シナリオでは、クタ地区がマリンリゾート地であることを考慮して最も人が集まる8月の夕方を想定時期とした。1世帯あたりの人口は2000年人口センサスよりバリ島のデータ3.9人を用いた。ホテルの宿泊者数は、クタ地区の総部屋数(493ホテル、18,568部屋)、8月のホテル稼働率(53.89%)に対し、1部屋あたりの宿泊者数と夕方にホテル敷地内にいる宿泊者の割合をそれぞれ2名、40%と仮定し、津波の影響を受ける人数を1ホテルあたり16.2名と想定した。また、この時間帯にビーチにいる人数は現地調査の結果から0.1人/m²とし、ショップにいる人数は算定が困難であるため1世帯あたりの人口3.9人を用いた。死亡率については浸水深との相関式を使うこととし(表-3)、日本(中央防災会議「東南海・南海地震等に関する専門調査会」)およびスリランカ(2004年スマトラ島地震)の事例を用いた。さらに日本の事例では防災意識の高低によって2ケースを想定した。

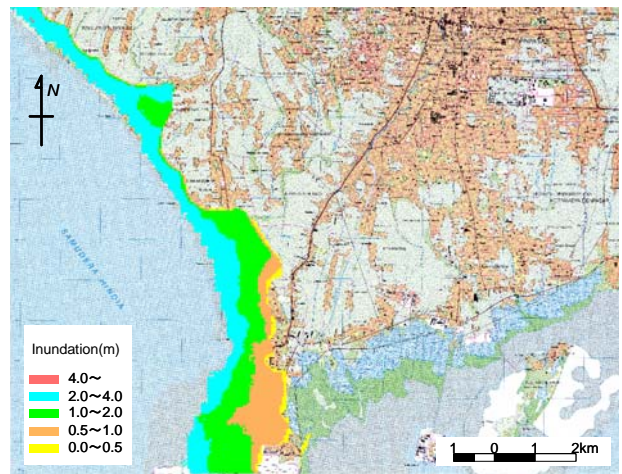


図-3 津波によるクタ地区の最大浸水深 (m)

表-2 被害想定の際条件

| 項目 | 想定時期 | | 想定時間帯 |
|------|--------------------|-----------------------------------|----------|
| シナリオ | 8月 | | 夕方 |
| 家屋種別 | 人数 | 建物価格 | 家財道具価格 |
| 家屋 | 3.9 | 10億ルピア (625m ² あたり) | 0.75億ルピア |
| ホテル | 16.2 | 125億ルピア (1階あたり) | 10億ルピア |
| ショップ | 3.9 | 10億ルピア | 10億ルピア |
| ビーチ | 0.1/m ² | - | - |

表-3 死亡率 (%) の推定式

| | 設定 | 死亡率推定式 | |
|-------|----------|-------------------------------|-----------|
| ケース A | 日本の事例 | $Y = 0.0282e^{0.2328X}$ | Y: 死亡率(%) |
| ケース B | スリランカ的事例 | $Y = 0.029e^{0.225X} + 0.112$ | X: 浸水深(m) |

家屋被害については、持ち主等に対するヒアリング結果をもとに、建物の価値についてはホテル（4階建て）を500億ルピア（約5億円）、家屋を10億ルピア（約1,000万円）とした。家財道具の価値については、同様にホテルおよびショップを10億ルピア（約1,000万円）、家屋を0.75億ルピア（約75万円）とした。被害率については浸水深との相関式を使うこととし、前述のスリランカ的事例を用いた（表-4）。

表-4 建物被害率の推定式

| | |
|--|---|
| $P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{30}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dx$ | $P(x)$: 被害発生率(全壊および被害有り) |
| | x : 浸水深(m) μ : 全壊: 2.7m、被害有り: 0.6m σ : 全壊: 0.6m、被害有り: 0.8m |

3.2 人的被害の想定

シミュレーションを行った各マグニチュード毎に死者数を整理した結果を図-4に示す。ケースAは日本の津波事例による死亡率でA-1は防災意識が高い場合（警報後直ちに避難）、A-2は低い場合（警報後しばらくしてから避難）である。ケースBは2004年スマトラ島地震におけるスリランカ的事例であり、住民には津波の知識も避難情報もない状況で津波が来襲した場合である。図-2で例示したM8.5クラスの津波が来る場合には、死者数が169~12,784人と推定され、防災意識の啓発や予警報システムの有無によって死者数が最大1/100程度に軽減される可能性を示している。

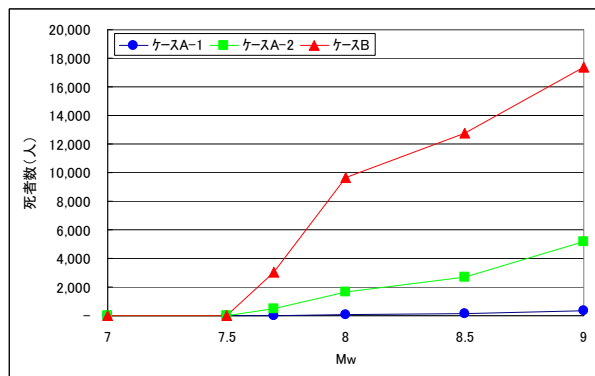


図-4 人的被害の想定結果

3.3 建物被害の想定

各マグニチュード毎に得られた建物被害（被害額）の結果を図-5に示す。図-2で例示した津波の事例では、建物及び家財道具の被害額は2兆8千億ルピア（約280億円）にのぼる結果となった。

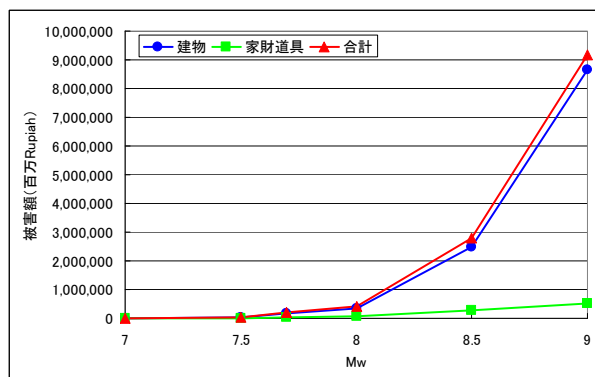


図-5 建物被害の想定結果

4. 外力設定と浸水想定（チッタゴン、高潮）

4.1 外力の設定

チッタゴンはバングラデシュ東部のベンガル湾に面した都市である（図-6）。高潮の外力は、大きな被害を出した1991年のサイクロンを参考に設定した。気象場、波浪場及び高潮の計算を行うにあたり、潮位変動と波浪の影響の相互干渉を考慮する必要があることを踏まえ、気象場についてはメソスケール大気シミュレーション予測モデルのMM5を、波浪場については第3世代波浪推算モデルのSWANを、高潮については準三次元モデルのPOMを用いることとした。計算領域および計算条件を図-7及び表-5に示す。

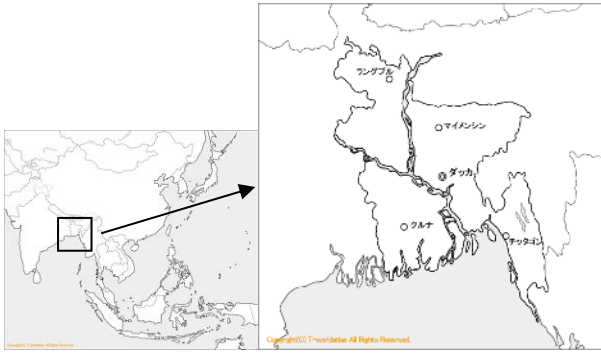
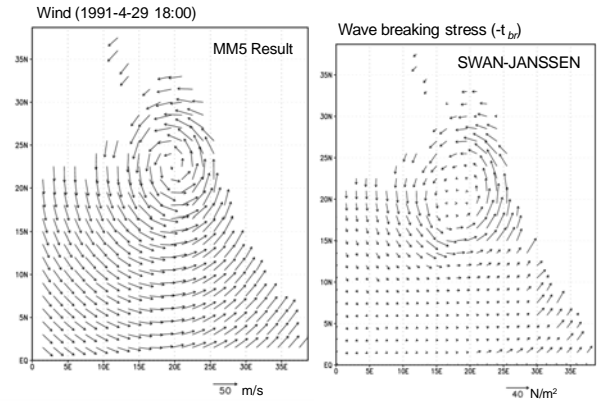


図-6 バングラデシュ位置図



18:00の風の分布 18:00の砕波せん断応力の分布

図-8 風速および砕波せん断応力分布

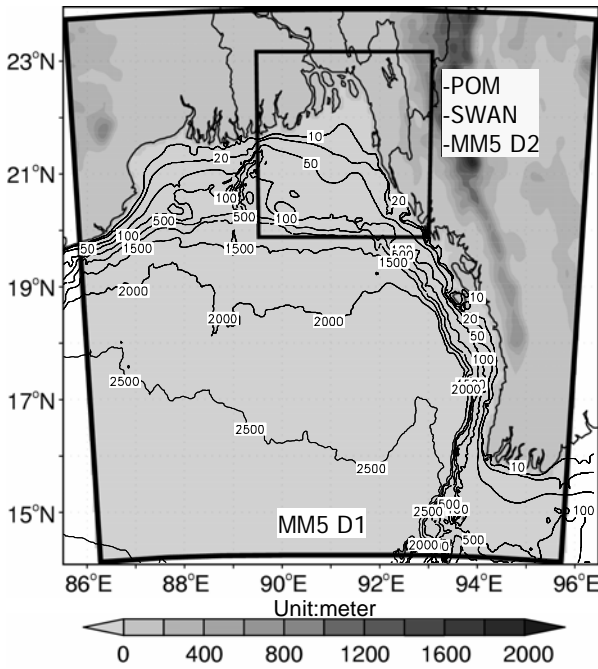


図-7 計算領域

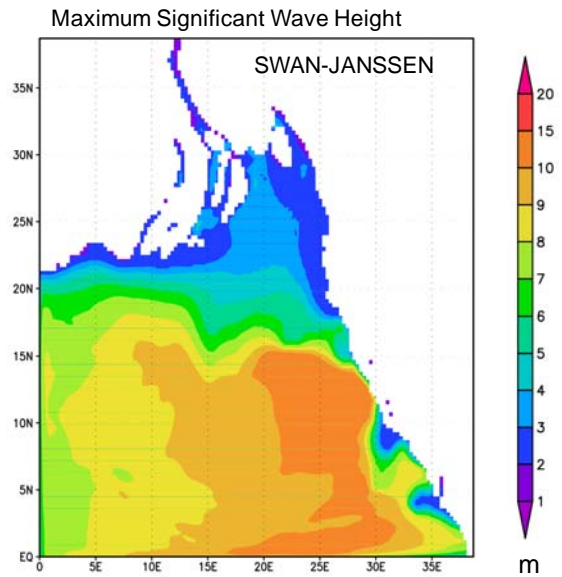


図-9 有義波高の最大値の平面分布

表-5 計算条件

| | Domain-1 | Domain-2 |
|--------|---|----------|
| 時間ステップ | 20 秒 | 6.67 秒 |
| 計算点 | 水平: 130×130 点 鉛直: 23 分割 (地上~100hPa) | |
| 計算期間 | 0000UTC 28 April, 1991~ 1200UTC 31 April, 1991 | |

計算結果の一例として、1800UTC 29 April の風速分布と砕波せん断応力分布を図-8 に示す。風速は最大で 50m/s 級となっている。図-9 は波浪の推算結果として有義波高の最大値を平面図におとしており、チッタゴン地区周辺で最大 10m 近い波浪が来襲することを示している。

高潮の浸水範囲については、1991 年サイクロン時にはチッタゴンの大部分が浸水したこと、市街を流れるコンノフリ川に沿って高潮の遡上が確認されたことを考慮して決定した (図-10)。

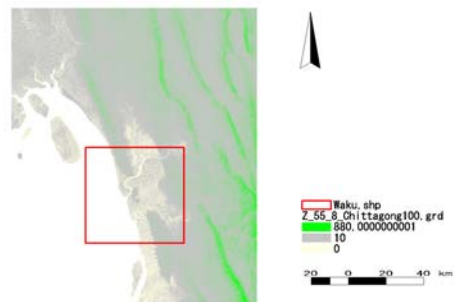


図-10 高潮浸水計算の範囲 (赤枠)

4.2 浸水想定

4.1 で設定した条件をもとに、チッタゴン地区における高潮の浸水状況を再現した。図-11 はチッタゴン地区における最大浸水深の分布を示しており、波浪の影響を考慮しない場合とする場合の2ケースを考えた。

シミュレーションでは河川からの流下を考慮していないため高潮の遡上が過大に評価されている可能性が高いが、特に波浪の影響を考慮したケースではコンノフリ川の遡上が数 km に及ぶ結果になった。また、1991 年サイクロンの実測浸水深はコンノフリ川下流右岸側で約 5m 程度であったに比べると、計算結果は過小傾向となっている。シミュレーションに用いた地形データ (SRTM) の地盤高が厳密には地表ではなく建物も含めた高めの数値であることが影響している可能性があるが、今回はそのまま使用することにした。

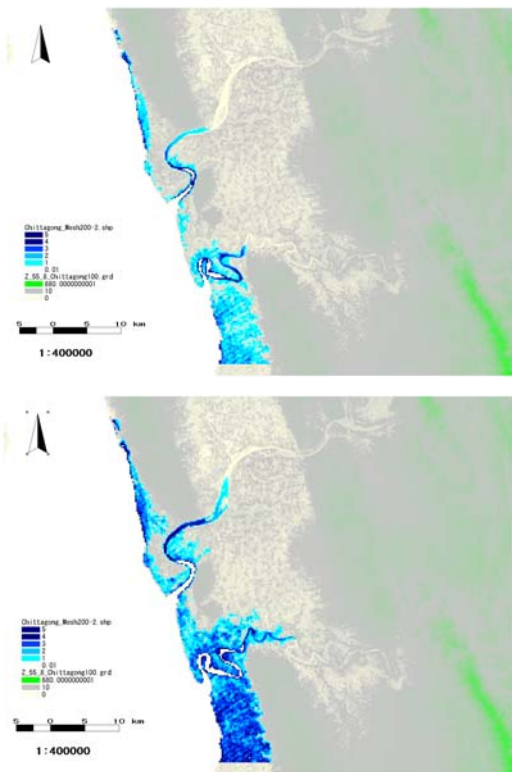


図-11 最大浸水深の計算結果
(上：波浪の影響を考慮せず、下：影響を考慮)

5. 被害想定 (チッタゴン、高潮)

5.1 被害想定シナリオの設定

被害想定は、人的被害および建物被害を対象に行った。表-6 は諸条件を整理したものである。

シナリオでは、サイクロンが発生する雨季と乾季の変わり目である 4~5 月および 10~11 月を想定時期とした。

近年大きな被害をもたらした 1985 年サイクロン (5 月)、1991 年サイクロン (4 月末) を参考に 5 月とした。また、時間帯は多くの人が自宅にいる時間帯として早朝とした。人口分布については、これまでの調査等で特に沿岸地域は季節労働者の流入が激しいことが判明していることから、複数の人口分布を想定することとした。このため「市内全域に居住」「衛星画像で居住地区と思われる場所に限定」の 2 パターンを考えた。1 世帯あたりの人口はチッタゴン市の 2001 年人口センサス (面積 168.07km²、世帯数 417,339、人口 2,023,489 人) より 4.8 人とした。人的被害の算出に使用する死亡率については、中央防災会議「大規模水害対策に関する専門調査会」における推定方法を参考とし、高所に避難する場所の有無に応じて 2 ケース (ケース A、ケース B) を設定した (表-7)。

表-6 被害想定諸条件

| 項目 | 想定時期 | | 想定時間帯 |
|------|-------|--------|----------|
| シナリオ | 5 月 | | 早朝 (5 時) |
| 家屋種別 | 人数 | 建物価格 | 家財道具価格 |
| カッチャ | 4.8 人 | 4 万タカ | 16 万タカ |
| パッカ | | 13 万タカ | 20 万タカ |

1 バングラデシュ・タカ=約 1.3 円 (2009 年 12 月)

表-7 死亡率 (%) の推定

| | 浸水深 | 死亡率 |
|-------|-------------|--------|
| ケース A | ~1.2m 未満 | 0.023 |
| | 1.2~1.8m 未満 | 12.000 |
| | 1.8m~ | 91.750 |
| ケース B | ~3.9m 未満 | 0.023 |
| | 3.9~4.5m 未満 | 12.000 |
| | 4.5m~ | 91.750 |

ケース A: 家が全壊、高所がない等避難する場所がない場合
ケース B: 家の 2 階床面程度 (2.7m) の高さに避難できる場合

家屋被害については、現地調査の結果を踏まえて『カッチャ』と呼ばれる非恒久住宅 (砂、砂質粘土と藁を混ぜて作った壁と藁葺き屋根) と『パッカ』と呼ばれる恒久住宅 (レンガや切石の組積造) に分類し、被害率に差を付けて試算した。被害率については、治水経済調査マニュアル (案) の A グループ (地盤勾配 1/1000 未満) の各水深毎の被害率をパッカの標準値とし、構造物が脆弱なカッチャについてはその標準値を割増すこととした。1991 年サイクロンの被害実態 (カッチャの被害率 67%、パッカの被害率 50%) をもとにカッチャの割増率を $67/50=1.34$ と設定し、上限を 100% として設定した被害率が表-8 である。建物の価値は持ち主等に対するヒアリング結果をもとに、カッチャを 4 万バングラデシュ・タカ (約 5 万円)、パッカを 13 万タカ (約 17 万円) と

した。家財道具の価値については、同様にカッチャで16万タカ（約21万円）、パッカで20万タカ（約26万円）とした。

表-8 家屋被害率 (%) の設定

| 家屋種別 | 浸水深 (cm) | | | | |
|------|----------|-------|---------|---------|-------|
| | ~50 | 50~99 | 100~199 | 200~299 | 300~ |
| カッチャ | 12.3 | 15.9 | 35.6 | 77.7 | 100.0 |
| パッカ | 9.2 | 11.9 | 26.6 | 58.0 | 83.4 |

5.2 人的被害の想定

シミュレーションを行った各ケース毎に死者数を整理した結果を図-12に示す。市内全域に住民が居住し家が全壊またはもともと高所がない等避難場所がない場合と想定したケースで最大の29万人の死者、衛星写真で居住地区と判断した場所で家の2階に避難できると想定したケースで最小の3千人弱の死者数が推定された。なお、1991年サイクロンについて同様のケースで推定した死者数と実際の死者数1,651人を比較して最も近似したのは、条件を「人口分布を居住地区に限定」「2階床面程度の高さに避難」と想定したケースであった。

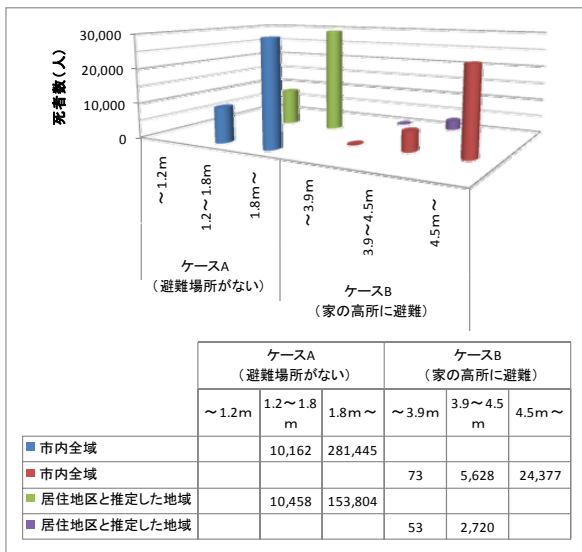


図-12 人的被害の想定結果

5.3 建物被害の想定

図-13に建物被害（被害額）の結果を示す。パッカ、カッチャの戸数はそれぞれ20,494戸、32,585戸であるので一戸あたりの被害額を計算するとパッカで約7万タカ（家屋）及び約16万タカ（家財道具）、カッチャで約3万タカ（家屋）及び約12万タカ（家財道具）となり、家のタイプに応じて15~23万タカ（20~30万円）の損害となる。

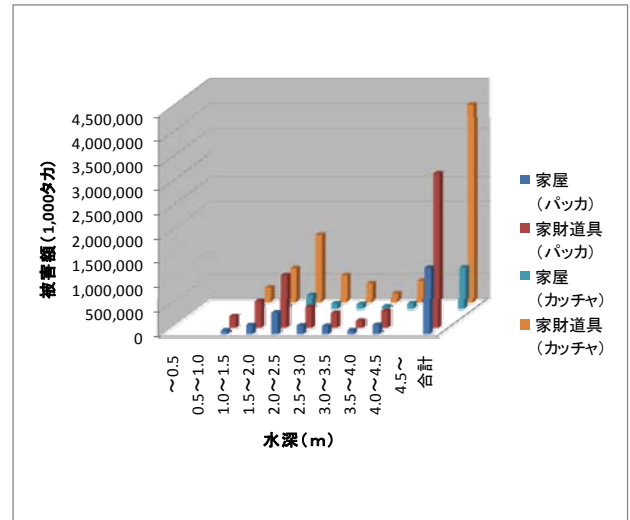


図-13 建物被害の想定結果

6. 災害リスクマップの作成

クタ地区における津波災害のリスクを地図上に整理することを試みた。家屋は無い人が集まるビーチ（評価エリア1）、家屋が集中する住宅地（評価エリア5）等の6エリアに分類した（図-14）。チッタゴンについて同様に分類したものが図-15である。最終的に分類した各地区毎に人的被害、家屋被害等をレーダチャートで表現した（図-16, 17）。例えば、リスクのうち死者率は「死者数/エリア人口」で表しており、1（最大値）の場合はエリア内の全人口が犠牲となることを意味する。

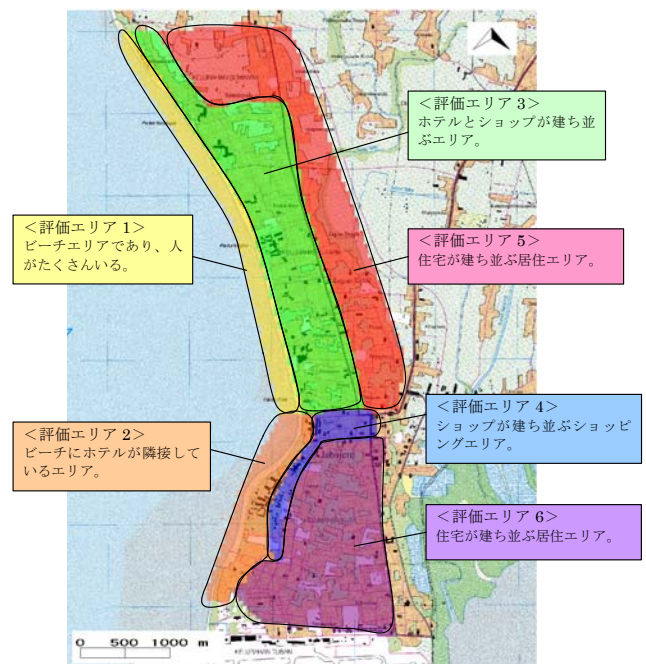


図-14 クタ地区のエリア設定



図-15 チッタゴンのエリア設定

7. まとめ

本研究では、アジアモンスーン地域で甚大な被害をもたらすと想定されている津波、高潮災害について、沿岸部の比較的人口が集中している都市の災害リスク評価を試みた。途上国を対象としたこのような検討では、精度の高い十分な統計資料が得られない等の課題はあるが、公開されているデータをもとに実施可能な一手法と考えている。

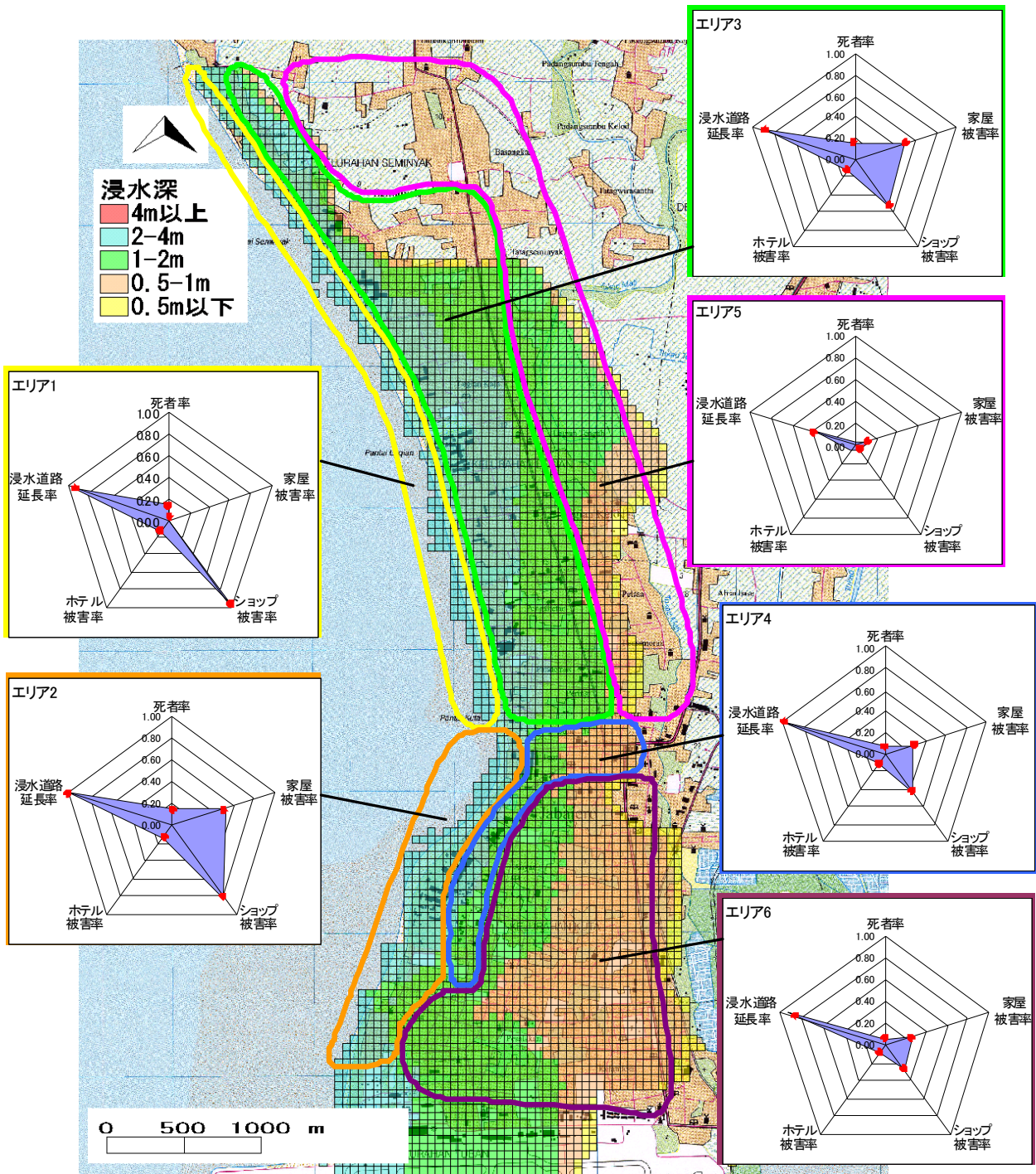


図-16 クタ地区における津波災害リスクマップ

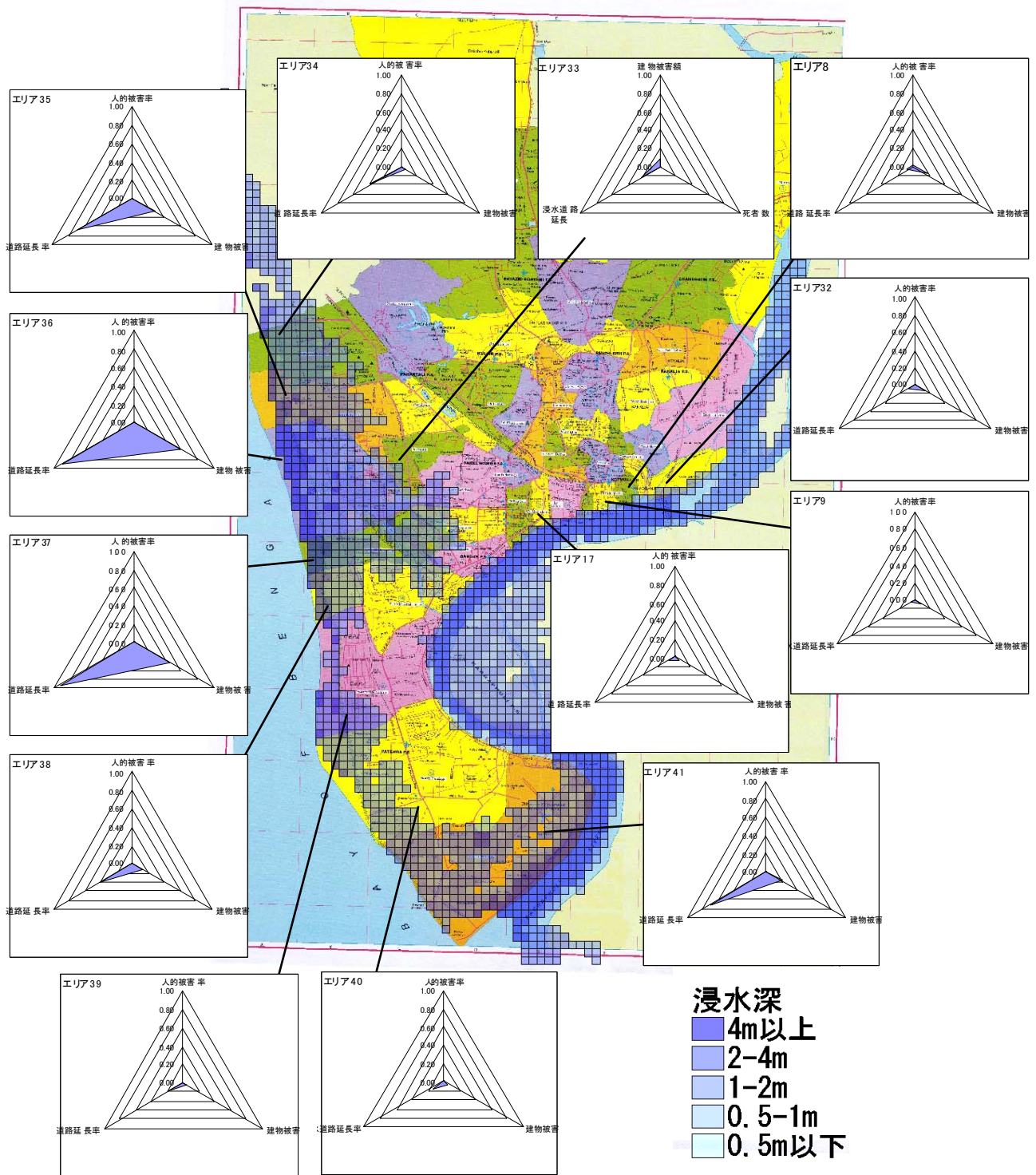


図-17 チッタゴン地区における高潮災害リスクマップ