

一般地理情報とインド洋津波被害資料を用いた 津波被害の広域推定法構築の試み

DEVELOPMENT OF A BROAD-BASED ESTIMATION METHOD OF TSUNAMI
DAMAGE USING GENERAL GEOGRAPHIC INFORMATION AND INDIAN
OCEAN TSUNAMI DAMAGE DATA

山本吉道¹・ウィブール ウッチャン²・飯田邦彦³・河合恭平⁴

Yoshimichi YAMAMOTO, Wibool WUTTHIYAN, Kunihiko IIDA and Kyohei KAWAI

¹フェロー 博(工) 東海大学教授 連合大学院理工学研究科 (〒259-1292 神奈川県平塚市1117番地)

² Lecturer of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (Bangkok, Thailand)

³正会員 工修 東海大学准教授 (〒259-1292 神奈川県平塚市1117番地)

⁴ 東海大学大学院生 (同上)

We tried to devise a method for estimating the degree and geographic extent of tsunami damage using satellite photographs in two case studies of damage to Thailand's west coast due to the Indian Ocean tsunami. Following results were obtained from those case studies: the extent of a flood area can be generally estimated from discoloration of vegetation zone assuming such vegetation originally existed along the coast; house damage could be estimate by deciphering whether each roof was lost or not, however if the roof remained, the degree of damage to walls and pillars could not be discerned.

Therefore, we develop a method to get marginal thickness of walls and marginal width of pillars which break on arbitrary positions using a distribution of tsunami heights on a coastline and a distribution of ground heights. In addition, the extent of a flood area can be presumed if there are the above-mentioned distribution data and elapsed data of sea water levels at the time of a tsunami invasion.

Key Words : *The Indian Ocean tsunami, Thailand, satellite photograph, estimating method of tsunami damage, flood area, house damage*

1. はじめに

甚大な被害を及ぼす津波災害が世界のどこかで数十年おきに発生しており、わが国でも東海・東南海・南海地震による大津波発生が予想されている。現在の技術レベルで、津波の発生を防ぐことは不可能であるが、被害の程度を低減させることは、その被害を詳細に予測できれば容易になる。本研究は、2004年インド洋大津波による被災資料が多く残っているタイ西部海岸を対象に、その被災資料と一般的な地理情報とによる解析から、広域での被害程度を容易に推定できる方法の構築を試みた。

2. 研究手順

(1) 現地踏査と衛星写真判読

2005年1月中旬に、津波被害の大きかったタイ

国西部沿岸で、低地で植生帯が広がっていたパンガン県カオラック海岸と鉄筋コンクリート構造物が集中していたプーケット島パトンビーチにて、詳細に被害調査を行った(山本ら¹⁾, Yamamotoら²⁾)。

さらに、2006年9月下旬に、不足資料の収集と共に、対象海岸の津波被災前と被災後の高分解能の画像を、それぞれ、空中写真とIKONOSで撮影された衛星画像から入手し、全浸水域、および、各地点での家屋被害程度の読み取りを試みた。

両海岸の全景画像を図-1と図-4に、典型的な被災前後の比較画像の例を図-2に、被災事例の地上写真の例を図-3と図-5に示す。また、家屋被害の評価結果を表-1に示す。

図-1, 4は白黒で縮小したものであるため判りにくい、原画像によれば、カオラック海岸では植生帯の変色から浸水域の広がりやを容易に判別できたが、パトンビーチでは浸水域が構造物の密集する市街地内にほぼ止まったため、それを判別できなかった。

両図中の白色線はタイ国政府による浸水境界線であるが、カオラック海岸については、白色線より海側で植生帯が荒らされて変色している状況が良く判る。

また、図-2 に示すように、衛星画像からは、屋根流失の有無、さらに、屋根の無い場合に、条件が良ければ、原画像上で柱や壁の破壊程度も判読できた。一方、屋根が残っている場合は、屋根を支えている柱も残っているであろうが、壁の破壊程度を判読出来なかった。特に、パトンビーチでは、ほぼ全ての建物がしっかりとした鉄筋コンクリート造りで、屋根が壊れるほどの被害は無かったため、被害状況をまったく判読できなかった。

それゆえ、次に、現地踏査時の記録から、要所構造物（例えば、図-3、5）の被害程度を評価する。



図-1 Khao Lak 海岸の被災後衛星画像
(2004 年 12 月 29 日)

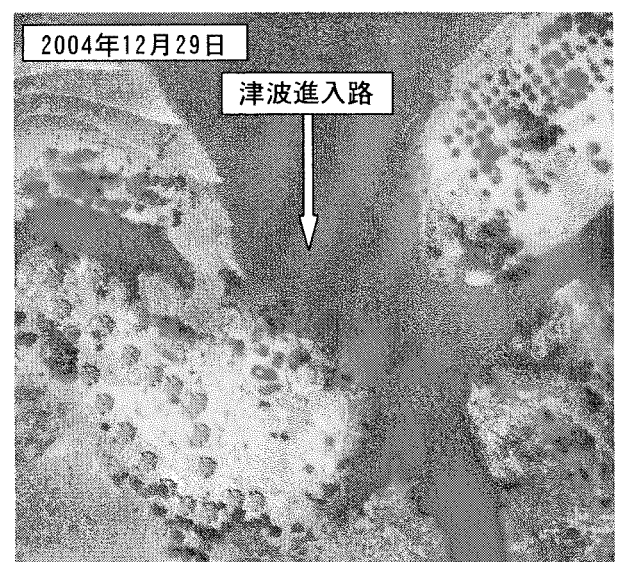
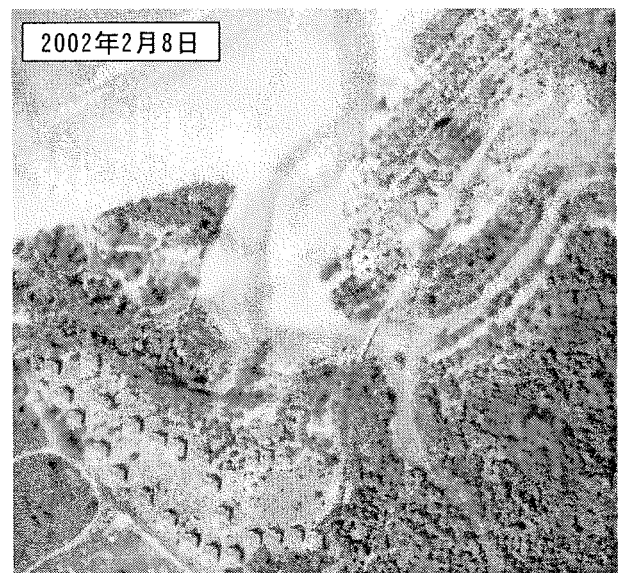


図-2 Khao Lak 海岸B地点での被災前後の衛星画像比較（左下の2軒と右上2軒の大型家屋は屋根によって壁の破壊程度が判らないが、他の家屋は根こそぎ流されていることが判読出来る）



図-3(1) Khao Lak海岸A地点での被災後地上写真
(2005 年 1 月 10 日：衛星写真では屋根が邪魔して判読できなかったが、1 階部分の壁がほぼ無くなってしまっている)

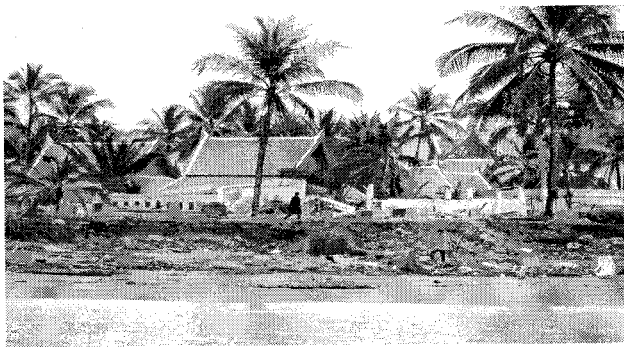


図-3(2) Khao Lak 海岸 F 地点での被災後地上写真
(2006 年 9 月 24 日：手前の家屋は根こそぎ倒れ
いえるが、その陸側の家屋は屋根が残っている)



図-4 Patong beach での被災後衛星画像
(2004 年 12 月 29 日)



図-5 Patong beach B 地点での被災後地上写真
(2005 年 1 月 12 日：1 階部分の窓が浸水により
完全に破損しているが、それ以上の破壊はない)

(2) 地上情報も含めた家屋被害評価法の開発

タイ国の王立測量局から頂いた数値データを基に
作成した両海岸の地盤高分布を図-6 と図-7 に示す。

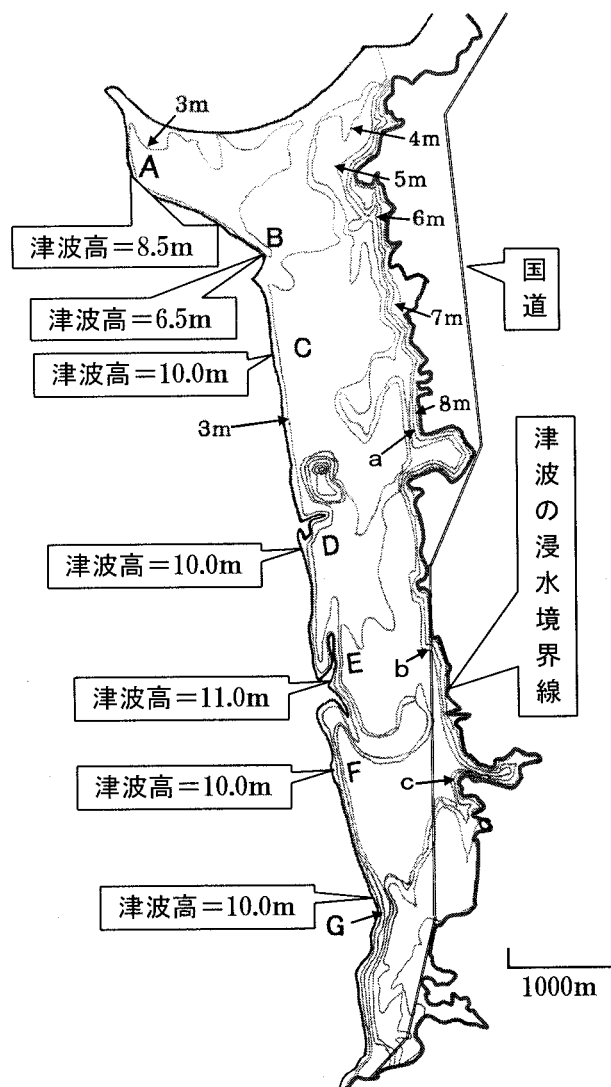


図-6 Khao Lak 海岸の地盤高分布と調査位置

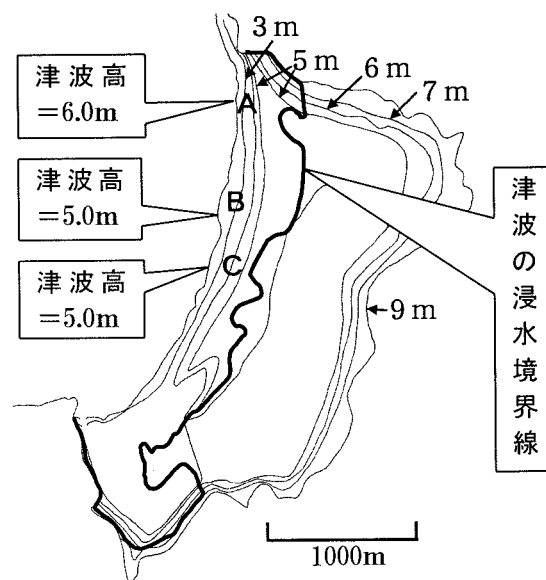


図-7 Patong beach の地盤高分布と調査位置

表-1(1) Khao Lak 海岸での家屋等の被害評価結果

地点 No.	実測浸水深(m)	実際の被害状況	計算浸水深(m)	Bo (m)	(1)式による低減比	修正浸水深(m)	推定の被害状況	一致度
A	4.0	1階の壁が破壊	5.0	50	0.949	4.7	1階の壁が破壊	○
B	4.0	1階の壁が破壊	4.5	150	0.876	3.9	1階の壁が破壊	○
C	5.0	1階の壁が破壊	6.0	100	0.800	4.8	1階の壁が破壊	○
D	4.5	1階の壁が破壊	5.5	80	0.866	4.8	1階の壁が破壊	○
E	-	1階の壁が破壊	5.5	100	0.866	4.8	1階の壁が破壊	○
F	5.5	25cm 以下の柱も折れて、全壊	6.0	200	1.000	6.0	25cm 以下の柱も折れて、全壊	○
G	-	25cm 以下の柱も折れて、全壊	6.0	60	1.000	6.0	25cm 以下の柱も折れて、全壊	○
a	1.5	破壊なし	2.5	100	0.531	1.3	破壊なし	○
b	1.0	ブロック壁転倒	2.0	50	0.504	1.0	ブロック壁転倒	○
c	0.5	船が運ばれてきた	2.0	50	0.488	0.9	船が運ばれてきた	—

表-1(2) Patong beach での家屋等の被害評価結果

地点 No.	実測浸水深(m)	実際の被害状況	計算浸水深(m)	Bo (m)	(1)式による低減比	修正浸水深(m)	推定の被害状況	一致度
A	2.5	壁は破壊せず、窓のみ破壊	2.0	50	1.000	2.0	壁は破壊せず、窓のみ破壊	○
B	2.0	壁は破壊せず、窓のみ破壊	2.0	100	1.000	2.0	壁は破壊せず、窓のみ破壊	○
C	1.0	破壊なし	1.0	50	0.678	0.7	破壊なし	○

図-6, 7 (津波高は海岸線での値で、松富ら³⁾と我々の記録から推定した) に記した各地点の家屋等の、現地踏査による被害状況、浸水深等を表-1に示してある。

図-6, 7 において、両海岸の浸水境界線は、海岸線の位置での津波高に比較的近い地盤高になっている。インド洋津波のような周期が長い津波来襲の場合は、概ね津波高まで浸水すると考えて良いようである。それゆえ、対象地点の地盤高と、そこへ流入する海岸線位置での津波高から、家屋に作用する津波力を算定するために必要な浸水深が求められるようにする。

まず、表-1 の津波高と地盤高の差 (計算浸水深) と実測浸水深 (痕跡高) の相関を調べると、図-8 のように比較的良好であったが、計算値の方がやや大きくなっている場合が多くある。

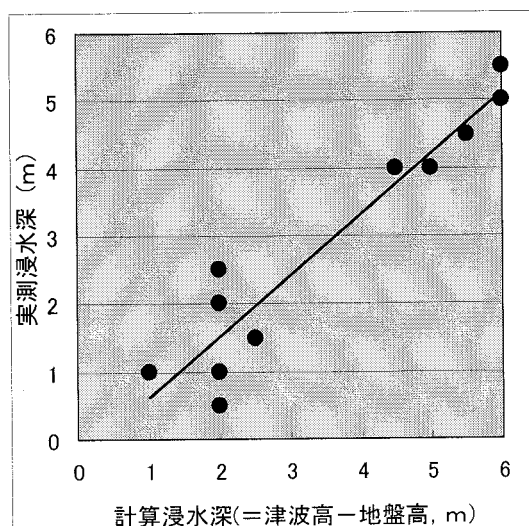


図-8 浸水深の実測値と計算値の相関

これは、海岸線から対象位置までの間にある障害物の影響を考慮していないからであり、次に、障害物間の通過エネルギーと全エネルギーの比で計算浸水深を修正する方法を検討した結果、図-9 に示す簡易法を提案できる。

$$\text{修正浸水深 } h_n = \sqrt{\frac{B_1}{B_0}} \times \sqrt{\frac{B_2}{B_0}} \times \cdots \times \sqrt{\frac{B_n}{B_0}} \times h_0 \quad (1)$$

ここに、 B_0 は、津波が対象構造物 (群) に直接影響を及ぼす範囲の沿岸方向幅のことで、対象構造物 (群) の沿岸方向幅に、その半分の長さを沿岸方向両サイドに加えた値とする。すなわち、対象構造物 (群) の沿岸方向幅の2倍の値とする。

$B_1 \cdots B_n$ は、前面障害物が海岸線からの進入経路上で n 重に存在する場合の、各障害物ごとの開口幅のことである。

h_0 は、障害物が無い場合の計算浸水深である。

また、障害物の両サイドから回り込むエネルギー成分や、空隙がある場合に通過するエネルギー成分が存在する。この成分を C で表して、 B_i は次のように修正する。

$$\text{修正開口幅 } B_i = B_i + (B_0 - B_i) \times C \quad (2)$$

ここに、家屋の C は $\frac{1}{9}$ 、木の C は $\frac{1}{2}$ とする。

なお、この経験係数は、実測値に合うように粗く設定した値であり、さらなる検討が必要である。

図-9 計算浸水深の修正方法の説明

さらに、対象構造物前面の浸水深 (h) が判れば、外力である津波力 (F) を飯塚・松富⁴⁾ の式 (3) から求め、構造物の基本要素である柱や壁の安定性を簡単に判別する方法を考案する。

$$F = 0.5\rho hv^2 = 0.5\rho h(1.1\sqrt{gh})^2 \quad (3)$$

ここに、 ρ は海水の密度、 v は津波の遡上流速、 g は重力加速度である。

まず、現地踏査を基に代表的な家屋骨組として、高さ3mで柱間隔5mの門形ラーメン構造（Yamamotoら²⁾を参照）を採用し、柱に対しては、部材対鉄筋の断面比率が0.0365で、海側と陸側に鉄筋を配した複鉄筋コンクリート断面を考え、津波力と上部家屋自重（柱一本で2.5m×5.0m×0.6mのコンクリート塊相当）を作用させ、壁に対しては、無筋コンクリートと、直径1.3cmの用心鉄筋が10cm間隔で入った鉄筋コンクリート断面の二種類を考え津波力のみを作用させた応力計算を行って、津波によって壊れない鉄筋コンクリート柱の限界幅、および、無筋コンクリート壁と鉄筋コンクリート壁の限界厚を、浸水深から求められる**算定図-10～12**を作成した。ここで、津波圧がピークになる前に窓ガラスは割れて、家屋内外の静水圧は短時間でバランスするとしている。

なお、コンクリートの降伏圧縮応力には19,600 kN/m²、鉄筋の降伏引張応力には294,000 kN/m²、コンクリートの降伏せん断応力は14,700 kN/m²を用いている。

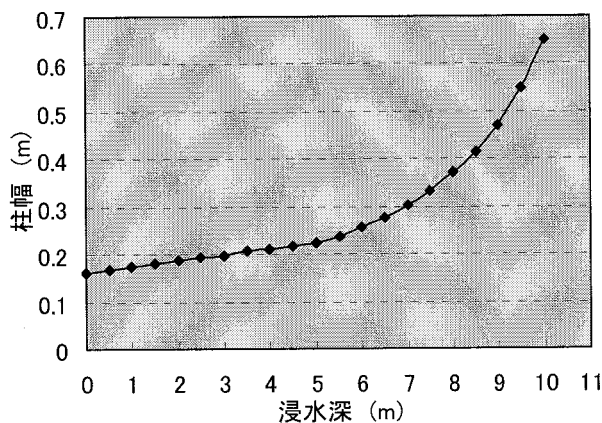


図-10 鉄筋コンクリート柱の限界幅

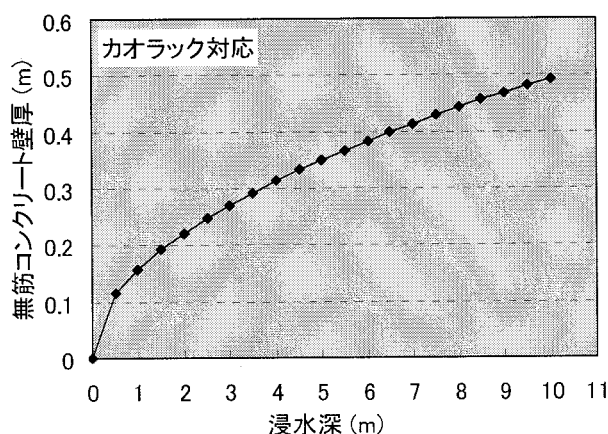


図-11 無筋コンクリート壁の限界厚

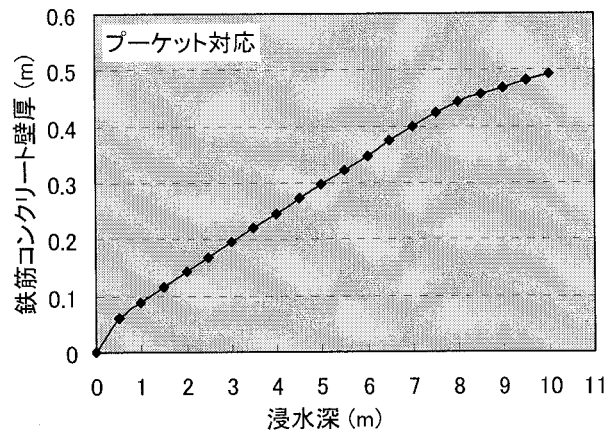


図-12 鉄筋コンクリート壁の限界厚

以上の算定図を表-1の修正浸水深（図-9の方法で修正）に当てはめると、下記のような結果となり、同表の右欄に記すように、実際の被害状況と概ね一致する。

- (a) カオラック海岸のA～E地点の構造物の柱は鉄筋コンクリート製25cm以上、壁は無筋の10cm～20cmであった。一方、修正浸水深は3.9m～4.8mであり、**算定図-10, 11**から、柱は壊れないが、壁は簡単に壊れることになる。
- (b) 同海岸のF, G地点の家屋の柱は鉄筋コンクリート製25cm程度、壁は無筋の10cm程度であった。一方、修正浸水深は6.0mであり、同算定図から、壁は勿論のこと柱も壊れることになる。
- (c) パトンビーチのA～C地点の家屋の柱は鉄筋コンクリート製25cm以上、壁は鉄筋の15cm以上であった。一方、修正浸水深は0.7m～2.0mであり、柱も壁も壊れないことになる。特に、C地点では浸水深0.7mであるから、窓も割れないはずである。

(3) 急勾配海岸での注意事項

津波用の打上げ高の算定式としてShuto⁵⁾等があるが、水平床と見なしてよい水深の決定が困難であるため、FreemanとMehaute⁶⁾の孤立波の打上げ高の算定式で、フルード数を式(3)で用いている値1.1とし、地表摩擦係数をやや粗めの値0.04で計算したところ、図-13に示すように現地海岸への津波の打上げ高と比較的整合しており、本式によって地盤勾配（海底から打上げ高までの平均勾配）と打上げ高の関係を調べると、海岸勾配が1/40程度より急になると、津波高よりも打上げ高の方が高くなるので、注意を要する。

すなわち、前述の浸水深計算法が合わなくなると考えられる。

海岸勾配が、さらに急になると、戻り流れの勢いも強くなり、これによる壁状構造物の海側への転倒破壊や砂浜の洗掘が無視できなくなると考えられ、

戻り流速を戻り流れ水塊重量の流下方向成分と全底面摩擦抵抗力の釣り合いから、さらに、戻り流れによる浸水深を打上げ高と任意流下地点間のエネルギー保存則から求めると、図-14 の式(4)、(5)のようになる。

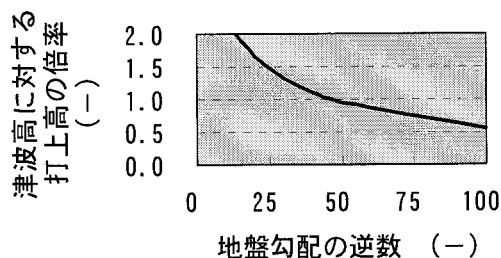


図-13 津波の打上げ高と地盤勾配の関係
(フルード数 1.1, 摩擦係数 0.04 の場合)

戻り流れによる地盤高 Z での浸水深 h は、
打上げ高 R , 地盤勾配角 θ , 地表摩擦係数 f を用いて、

$$h = \frac{\left(\frac{3}{4}R - Z\right)f}{\sin\theta + f} \quad (4)$$

また、その位置での戻り流速 v は

$$v = \sqrt{\frac{2 \sin\theta}{f}} \sqrt{gh} \quad (5)$$

図-14 戻り流速の計算法

式(4)、(5)の妥当性を確認するために、図-7 に示すパトンビーチ北端部の戻り流れを検討する。

この位置の地盤勾配は 1/20 程度で、津波高 6m に対する打上げ高は約 9.9m となり、実態とほぼ一致する。さらに、地表摩擦係数 0.04 を用いて地盤高 5m での戻り流れの浸水深および流速を求めれば、 $h \approx 1\text{m}$, $v \approx 5\text{m/s}$ となった。ここには天端高 5m で平均幅 1m のコンクリートブロック積み道路護岸があり、戻り流れで破堤していた (Yamamoto ら²⁾ 参照)。求めた戻り流れ浸水深と戻り流速を用いて安定計算すれば不安定となり、事実と矛盾しない結果を得られる。

3. 結論

- (1) カオラック海岸のような植生が広がっている地域では、色彩等に明瞭な違いが生じるため、衛星画像から津波浸水の境界を比較的正確に判読できた。一方、パトンビーチのように被害の少ない家屋が集中している地域では、浸水境界を明瞭に見出すことが出来なかった。また、両海岸の全域で戻り流れによる砂浜面積の減少が

認められた。特に、河口部や海岸に向かって伸びている道路で、これらが戻り流れの通り道になったためと推定されるが、砂浜の消滅が認められた。

- (2) 衛星画像は全体的概要把握に有効であるが、家屋被害推定については、屋根が流されている場合は柱や壁の破壊程度もある程度判読できたが、屋根がある場合は壁の破壊程度を判読できなかった。衛星画像と要所の現地踏査資料とを照らし合わせることで被害状況を詳細に把握できた。
- (3) 本研究で作成した算定式と算定図による家屋の被害推定と、被害実態との一致度は良好であった。海岸勾配が 1/40 程度より緩い海岸に周期の長い津波が来襲する場合、代表家屋群の各基本諸元を把握し、このような算定図を作成すれば、事前に津波被害程度を実用レベルで推定できることが判った。

謝辞：本研究は、東海大学と King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang の研究助成金によるものである。ここに両大学へ感謝の意を表します。また、当時に卒業研究生であった JA 市原市の齊藤拓也君と(株)イチケンの武田晃君にもデータ解析、作図で多大な助力を頂いた。両君に対しても感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山本吉道, 中山正広, 岩井健浩: スマトラ沖地震津波によるタイ西部海岸での被害実態調査の報告, 海洋開発論文集第21巻, pp.9-44, 2005.
- 2) Yamamoto, Y., Takanashi, H., Hettiarachchi, S. and Samarawickrama, S : Verification of destruction mechanism of structures in Sri Lanka and Thailand due to the Indian Ocean tsunami, *Coastal Engineering Journal*, Vol.48-2, pp.117-145, 2006.
- 3) 松富英夫, 他: タイのKhao Lak と Phuket島における2004年スマトラ島沖津波とその被害, 海岸工学論文集第52巻, pp.1356-1360, 2005.
- 4) 飯塚秀則, 松富英夫: 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集第47巻, pp.381-385, 2000.
- 5) Shuto, N. : Standing waves in front of a sloping dike, *Coastal Eng. in Japan*, Vol.15, pp.13-23, 1972.
- 6) Freeman, J.C. and Mehaute, B.L. : Wave breakers on a beach and surges on a dry bed, *Proc. ASCE*, Vol. 90, No. HY2, pp.187-216, 1964.