

タイ国南西部 Ko Kho Khao 島南部で生じたインド洋大津波以降の海浜地形変化

小岩 直人*・杉澤 修平**・葛西 未央***・松本 秀明****・TANAVUD Chalchai*****

1. はじめに

津波によって生じた地形変化に関する資料の蓄積は、防災・減災へむけての取り組みや、津波後の復興・修復を効率的に行う上でも重要な課題である。従来、津波が関与した地形変化の研究は、津波時に生じた変化を中心に議論されてきたが（たとえば西畑ほか，2005；Gelfenbaum and Jaffe, 2003）。2004 年のインド洋大津波以降，津波後の地形の再生過程に関する研究も行われるようになってきた（たとえば Choowong, *et al.*, 2009）。これらの研究によると，津波時に大規模に侵食された海浜地形が自然状態で津波後に数年間で修復され，津波前の地形へと修復されている事例が報告されつつある（Choowong, *et al.*, 2009；Liew, *et al.*, 2010）。

タイ国のアンダマン海に面している海岸部では，インド洋大津波時において，多くの地域で海浜地形の著しい変化が生じている。著者らは，タイ南西部の海岸において，インド洋大津波以降の地形変化のモニタリングを継続しているが，津波襲来時のみならず，津波を引き金として，それ以降に著しく地形が変化をし，津波前とは明らかに異なる地形が形成される地域があることをみいだした。本報告では，タイ南西部に位置する Phang Nga 県 Ko Kho Khao 島の南端部における津波時以降の地形変化過程について報告する。

2. 調査地域の概観および調査方法

*弘前大学

**日本郵便

***弘前大学・院

****東北学院大学

*****タイ王国ソクラ大学

2.1 調査地域の概観

調査地域はタイ国南西部に位置する（図 1）。調査地域のある Phang Nga 県は，インド洋大津波時にタイの中で最も甚大な被害が生じた地域の一つであり，タイ全体の死者数の 8 割弱がこの県に集中している（柳澤ほか，2007）。その中でも被害の著しかった Nam Khem 平野から Koh Kho Khao 島の地域では，地理学，津波工学，堆積学的視点からの多くの研究が行われている（たとえば海津ほか，2006；Hori *et al.*, 2007；柳沢ほか，2007）。インド洋大津波時には Pak Ko 川河口部付近の Koh Kho Khao 島南端や対岸の Nam Khem 村では 6 m 以上の津波浸水高を記録し，数値解析によれば市街地での津波流速は 3 ~ 4 m/s 以上とされている（柳沢ほか，2007）。Koh Kho Khao 島の南端部では，アンダマン海からの

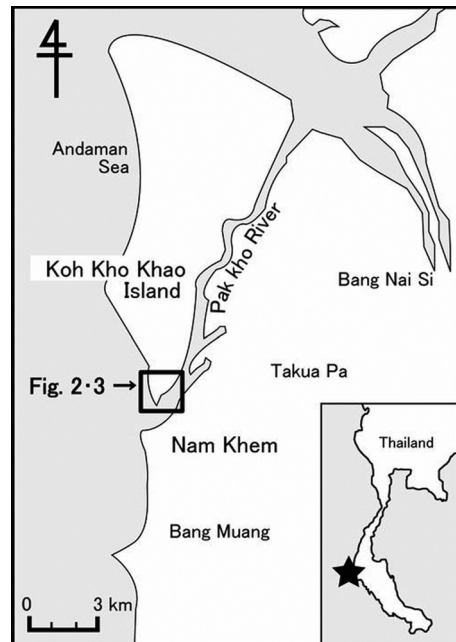


図 1 調査地域の概観図

津波と Pak Ko 川を遡上してきた津波によって浸水したものと考えられ、同島では 400 名以上の犠牲者がでている (行谷ほか, 2005)。

図 2 には、津波直後および津波時以降の衛星画像、および津波襲来前に存在していた砂嘴の位置を図示した。この砂嘴は、インド洋大津波において大規模に侵食されていることが指摘されているが (海津ほか, 2006)、その後の地形変化に関する報告はない。砂嘴の発達方向から調査地域近辺の沿岸漂砂の方向は北から南であると判断される。

撮影年次の異なる衛星画像から海岸線の変化が著しいことがわかる (図 2)。津波直後では、調査地域西部に位置するリゾート施設の西端は海岸線から 30 ~ 40 m 内陸に位置し

ているが、2009 年 1 月に撮影された衛星画像では、同施設は海上に突き出している。このリゾート施設では、常に護岸工事が必要となっており、護岸の整備が進んでいない施設北部ではコテージの基礎が洗い出されている状態となっている (写真 1)。また、リゾート施設の南方の海岸部では、海岸林をなすモクマオウの無数の倒木がみられる (写真 2)。

2.2 調査方法

2006 年 8 月 ~ 2010 年 11 月の計 6 回の現地調査を実施した (表 1)。現地調査では、GARMIN 社製の GPS である GPSMAP 60 CSx を使用し、海岸線の位置を計測した。また、オートレベル、レーザーテクノロジー社製の



A. 津波直後 (Google Earth 画像) B. 2006 年 2 月 28 日 (Google Earth 画像) C. 2009 年 1 月 20 日 (ALOS 画像)

図 2 調査地域の衛星写真



写真 1 津波後の海岸侵食によって建物の基礎が露出する宿泊施設
2010 年 11 月撮影



写真 2 海岸侵食で生じたモクマオウの倒木
2009 年 11 月撮影

表 1 現地調査時の潮位

調査日	時間	潮位(m a.s.l.)
2006.8.11	16:00	-0.7
2007.4.28	8:40	0.6
2008.12.16	9:30	-0.7
2009.5.12	11:20	0.8
2009.11.16	14:00	-0.7
2010.11.25	14:00	0.5

TruPulse を使用し、海浜地形の断面測量を実施した。現地調査によって得られた海岸線の位置と、2002 年～2009 年に撮影された衛星画像 (IKONOS, GoogleEarth, ALOS) を ESRI 社の ArcGIS 10 により重ね合わせを行い、津波前、津波時、さらに津波以降における海岸線の変化を検討した。なお、使用した GPS は位置精度が 10 m 以下と高くはないものの、交差点、建造物や電柱といった人工物

による位置補正を行い、また、測定は GPS が安定するまでの時間を十分に確保することで位置精度を高めるよう試みた。本研究は、数 m オーダーでの議論は不可能であるが、10 m オーダーでの経年変化を検討するには十分な精度を有していると思われる。なお、本研究では、平均海面高度、および海岸部の断面測量結果をもとに、潮位補正を行い海岸線の位置を決定した。

3. 津波時、およびそれ以降の海浜地形変化

3.1 海岸線の変化

図 3 に、調査地域における津波直後の衛星写真、2006 年～2010 年の 6 時期における海岸線を示した。Ko Kho Khao 島の南端部では、



図 3 Ko Kho Khao 島南部における海浜地形変化
星印、矢印は、それぞれ同一の施設を示す。衛星画像は Google Earth による。

津波時には約 57,500 m²の砂嘴が侵食されているが (図 2・表 2), 砂嘴の北に位置する海岸は大きく侵食されていない。しかしながら, 後者は津波時以降に著しく海岸侵食が進行し, 2004 年 12 月末～2010 年 12 月の約 6 年間で幅約 150 m (25 m/年), 長さ約 500 m の海岸が消失している。著者らは, 本地域の平常時の詳細な海岸地形の変化に関する資料は得ていないが, 調査地域南部の Khao Lak 地域では, 海岸線の変化は最大でも 5 m/年と示されていることから (Choowong, *et al.*, 2009), 本地域の津波後の 25 m/年という侵食速度は極めて大きい値であると判断できる。

海岸侵食は, 津波前の海岸線に平行ではなく, 当時の海岸線に斜交する形で進行している。その結果, リゾート施設を境に南部と北部では侵食速度が異なり, 前者で大きくなっており, 南部から北部へ侵食域が移動しているものと判断できる。

また, 各時期の侵食速度は一様ではなく, 年によって変動が大きい。たとえば 2008 年 12 月～2009 年 11 月の約 1 年間の侵食速度は 40～60 m/年 (最小: 15 m/年), 2009 年 11 月～2010 年 11 月は約 20～30 m/年 (最大: 40 m/年) と前者が大きくなっている。これは, 調査地域の中部に存在していたラグーンにまで侵食が及んだ前者の期間に, 急激な海岸線の後退が生じたと推定される。2009 年 11 月の海岸線の平面形は, その前後の時期にくらべて海側に突き出た部分があるが, その後, 2010 年までには大きく侵食され, 結果として平滑な海岸が形成されている。このように, 海岸～内陸にかけての地形分布も海岸侵食の速度に大きな影響を与えている。

3.2 砂嘴の地形変化

前述のように Ko Kho Khao 島南端部では, インド洋大津波により砂嘴が消失したことが指摘されているが, その後, 速やかに新たな砂嘴が形成されている。図 4 には, 津波時以降の 2006 年 2 月～2010 年 11 月の 7 時期における砂嘴の平面形および断面形の変化を示す。また, 津波直後の海岸線から各時期にお

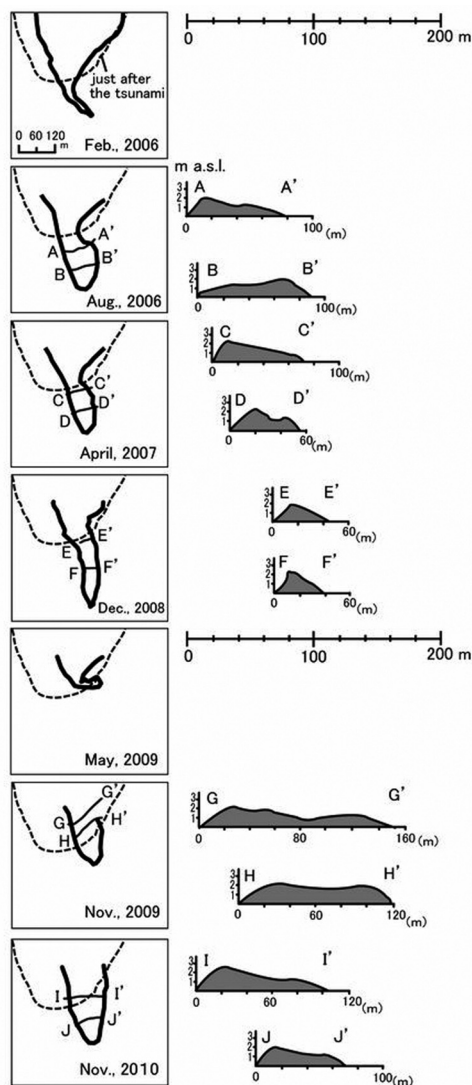


図 4 Ko Kho Khao 島南端部の砂嘴地形の平面形および断面形変化

表 2 砂嘴の面積および体積変化

	砂嘴面積 (m ²)	砂嘴体積 (m ³)
2006 年 8 月	19,450	29,175
2007 年 4 月	12,480	18,720
2008 年 12 月	13,060	19,590
2009 年 5 月	2,750	4,125
2009 年 11 月	6,330	9,495
2010 年 10 月	12,330	18,495
津波時の侵食された砂嘴面積		57,500

いて付加された砂嘴の面積を GIS にて求めた (表 2)。

2006 年 2 月にはすでに砂嘴の骨格が形成されているのが衛星画像からも判断できる (図 2-B)。その 6 ヶ月後 (2006 年 8 月) には砂嘴は東西に拡大し、長さ 240 m、最大幅 100 m に成長する (面積 19,500 m²)。この時期は、本観測期間の中で最大の面積を有する砂嘴が形成されている (図 4・表 2)。その形成位置は津波前の砂嘴とは異なり、津波前よりも東側 (内湾側) に形成され、さらに、砂嘴の方向は北北西-南南東方向 (以前は南北方向) に発達している。

砂嘴の横断面形は、いずれの時期においても西側に海拔 2 m 程度のピークを有し、西に急、東に緩やかに傾斜している凸型の断面形を示す (図 4)。現地調査では、どの時期においても断面形の頂部から東側にはウォッシュオーバー堆積物がみられることから、この凸型の地形がアングマン海からの越波によって成長している可能性が高いと判断できる。

これ以降、砂嘴は縮小傾向を示し、2009 年 5 月には 2,750 m² となる。この縮小傾向の時期には、砂嘴の形成位置は、全体的に東側へ移動している。これは、砂嘴北部の海岸侵食の影響だと思われる。2008 年 12 月には砂嘴中部が弧状に侵食されている。この時は地形断面図においても、明らかに侵食が進行している様子がわかる (図 4)。その後、砂嘴は、侵食が進み完全に消失すると予想されたが、2009 年 11 月以降、再度拡大傾向を示す (12,300 m²)。

4. 考察

ここでは、津波後に著しい海岸侵食が生じ

た原因について考察を行う。前述のように海岸侵食は従来の海岸線と斜交するように進行し、調査地域の南部で生じた海岸侵食が北部へ波及したと解釈できるであろう。写真 3 は 2009 年 1 月撮影の ALOS の衛星画像である。この画像からは、沖合で北西から南東へ一様に進行している北北東-南南西方向の波浪が、海岸に接近するにつれて分断されて、それぞれの東端部が Ko Kho Khao 島南端に集中するように読み取ることができる。また、Pak Ko 川は、上流側を Ko Kho Khao 島北部の河口部と連続する水道となっており (図 1)、干満の差が 2 m 以上となる河口部では潮流が激しくなっている。このような海域からの波浪が集中する河口部と潮流が激しい調査地域南部の沿岸では複雑な波浪状況を呈しているものと考えられる。以上のことをふまえると、津波後の海岸侵食の進行は、津波時に生じた砂嘴の侵食により、Ko Kho Khao 島南端部において Pak Ko 川へ波浪の進入を容易にするとともに、波浪条件を変化させた可能性がある。

次に、津波後に生じた海岸侵食と砂嘴の発達との関係を検討する。2006 年に実施した海岸部の横断測量をもとに作成した横断面図を図 5 に示す。この断面では、幅数十メートルの海拔 2 ~ 3 m の浜堤が 3 列みられ、高まりの間には凹地が存在している。これらは南北方向に連続しており、凹地の延長上は、ラグーンや低湿地となっているところが多い。

図 5 には、2008 年 12 月の汀線~浜堤の断面図も示している。2006 年 8 月の断面形と 2008 年 12 月の断面形から、この間に最も海側に位置する一列の浜堤が侵食されたことがわかる。この間に侵食された断面積は約 100 m² となり、この値に、2006 年 8 月

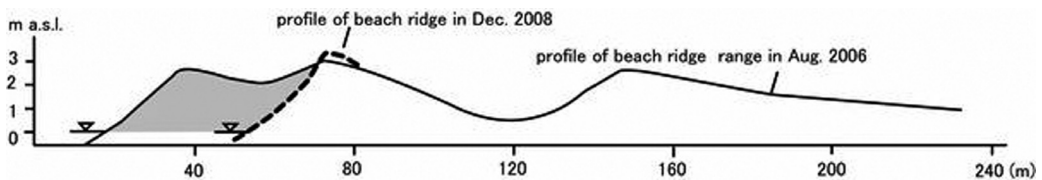


図 5 Ko Kho Khao 島南部における地形横断面図

～2008 年 12 月において侵食されている海岸の長さ 500 m を乗じて侵食された土砂量（海拔 0 m 以上の部分）を求めると約 50,000 m³ となる。また、横断面形（図 4）から、各時期の砂嘴の平均の高さを海拔 1.5 m とし、砂嘴の面積を乗じて、それぞれの時期の砂嘴構成層の土砂量を算出した。2006 年 8 月と 2008 年 12 月の砂嘴の土砂量は、それぞれ約 29,200 m³、約 19,600 m³ となり後者の土砂量が小さくなる。同期間において砂州の北側の海岸部で侵食された土砂（50,000 m³ の侵食量）は、南部の砂嘴の形成には直接関与していないことを示すものと判断できる。同様に、最も侵食速度が大きかったと推定される 2008 年 12 月～2009 年 11 月においても、約 19,600 m³（2008 年）、約 9,500 m³（2009 年）と砂嘴を構成する土砂量は減少している。しかし、2010 年には約 18,500 m³ と増加することから、この時期の著しい海岸侵食が、タイムラグを経て砂嘴の再拡大に関与している可能性も考えられるだろう。また、津波時に侵食された土砂量およびその後の海岸侵食で消失した土砂量と、砂嘴の形成による土砂量を比較した場合には、前者が数倍～数十倍大きくなっている。侵食された土砂の多くは、写真 3 にみられるように Pak Ko 川河口部や対岸の Nam Khem 村の北西端の浅海底に堆積していると推定され、これらの土砂は現段階では津波で消失した砂嘴地形の再生・復元をするに至っていないと考えるべきであろう。今後、地形変化のモニタリングを継続するとともに、津波および海岸侵食によって消失した土砂量、砂嘴構成層の土砂量の経年変化について GIS を用いて詳細な検討をする予定である。

5. まとめ

インド洋大津波で著しい地形変化がみられたタイ南西部の Ko Kho khao 島南端部において、津波後の地形変化のモニタリングを実施した。調査地域では津波により砂嘴が大規模に侵食されたが、小規模ながらもすぐに新たな



写真 3 衛星画像
ALOS 画像（撮影日 2009 年 1 月 20 日）、プリズム画像を GIS によりジオリファレンスを実施した。

砂嘴が形成され始めている。津波時に侵食を免れた海岸においても、津波後に 25 m/年以上の速度で海岸侵食が進行し、土地の流出が深刻な問題となっている。海岸侵食は、津波によって砂嘴が消失し、沿岸環境が変化し、波浪が Ko Kho Khao 島南端部へ集中するようになったために生じたと推定された。インド洋大津波時以降に新たに形成された砂嘴の土砂量は、津波時および津波後の海岸侵食によって生産された土砂量に比較してはるかに小さいことが明らかとなった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、東北大学大学院工学研究科災害制御センターの今村文彦教授、千葉工業大学惑星探査研究センターの後藤和久博士には、数多くのご教示、ご助言を頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

本研究は、平成 18-21 年度科学研究費補助金 基盤 A「2004 年インド洋大津波の被害実態を考慮した新しい津波工学の展開」（課題番号 18201033、研究代表者：今村文彦）の一部を使用したものである。

参考文献

- 海津正倫・Tanavud, C.・Patanaganog, B. (2006): タイ国アンダマン海沿岸 Nam Khem 平野の地形と津波の挙動および津波堆積物の空間分布. *E-journal GEO*, 1, 2-11.
- 行谷佑一・都司善宣・松本浩幸・Wattana, K., Mongkonkorn, S., Vorawit, M., 岩崎伸一 (2005): 2004 年インド洋地震津波のタイ国海岸 Phuket 島及び Khao Lak 以外の場所での浸水高調査. *海岸工学論文集*, 第 52 巻, 1351-1355.
- 西畑 剛・田島芳満・森屋洋一・関本恒浩 (2005): 津波による地形変化の検証 2004 年スマトラ沖津波スリランカ・キリンダ港. *海岸工学論文集*, 第 52 巻, 1386-1390.
- 柳澤英明・越村俊一・今村文彦・宮城豊彦・佐藤博幸・C. TANAVUD (2007): タイ Nam-kem でのマングローブ林の津波被害調査と破壊率評価. *津波工学研究報告*, 第 24 号, 71-76.
- Choowong, M., Phantuwongraj, S., Charoentitirat, T., Chutakositkanon, V., Yumuang, S. and Charusiri, P. (2009): Beach recovery after 2004 Indian Ocean tsunami from Phangnga, Thailand. *Geomorphology*, 104, 134-142.
- Gelfenbaum, G. and Jaffe, B. (2003): Erosion and Sedimentation from the 17 July, 1998 Papua New Guinea Tsunami. *Pure apply. Geophys.* 160, 1969-1999.
- Hori, K., Kuzumoto, R., Hirouchi, D., Umitsu, M., Janjirawuttikul, N., Patanakanog, B. (2007): Horizontal and vertical variation of 2004 Indian tsunami deposits: An example of two transects along the western coast of Thailand. *Marine Geology*, 239, 163-172
- Liew, S., C. et al. (2010): Recovery from a large tsunami mapped over time: The Aceh coast, Sumatra. *Geomorphology*, 114, 520-529.