

2004年インド洋大津波によるタイ・シミラン諸島での サンゴ被害の数値的評価

Numerical evaluation of the coral damages by the 2004 Indian Ocean tsunami at Similan Islands, Thailand

川俣秀樹¹・後藤和久²・今村文彦³

Hideki KAWAMATA, Kazuhisa GOTO and Fumihiko IMAMURA

Coral reefs are ecologically and economically valuable. After the 2004 Indian Ocean tsunami, the damages on corals were extensively studied by various international teams. However, there is no quantitative study that evaluated the relationship between the degree of the damage on corals and the hydraulic values of the tsunami. In this study, we investigated the relationship between the coral damages by the 2004 Indian Ocean tsunami and the hydraulic value of the tsunami at Similan Islands, Thailand, based on the numerical modeling of the tsunami inundation. As a result, it was found that the current velocity of the tsunami was one of the important factors for the damage of corals.

1. はじめに

サンゴ礁は、海洋生態系の基盤としての生態学的価値のみならず、漁場や観光資源としての経済価値が高い。そのため、海洋擾乱などの自然災害によるサンゴ被害は、自然環境や経済活動に対して大きな影響を与えることになる。一方、サンゴ礁は津波によっても大きな被害を受ける (Chavanichら, 2005)。例えば、2004年に発生したインド洋大津波は、タイのプーケットやシミラン諸島、モルディブ諸島など、サンゴ礁を観光資源とする地域に大きな被害を及ぼした (松富ら, 2005; Chavanichら, 2008; 藤間, 2005)。そのため、International Coral Reef InitiativeやCoral Cay Conservationなどのサンゴに関わる機関や研究者達により、被災後にインドネシア、タイ、マレーシア、ミャンマー、モルディブでサンゴ礁被害状況調査が行われた (例えば、UNEP, 2006)。そして、サンゴ群体の全体または部分的な破壊、転倒、舞い上がった土砂のサンゴ群体上への堆積、礁斜面の土砂崩れによる崩落などの被害が確認された (Chavanichら, 2008; Comleyら, 2005)。しかし、津波流況は局所的な地形条件で大きく変化すること、サンゴの生息形態や被害形態が複雑であることから、津波によるサンゴ被害は予測が極めて難しいとしている研究もある (Phongsuwan・Brown, 2007; Satapoominら, 2007)。ただし、この見解は津波によるサンゴ被害を津波水理量を用いて定量的に評価した上で導き出されたものではない。

本研究では、タイの海洋国立公園に指定され、サンゴ

礁生態系の観光資源としての価値が高いタイ・シミラン諸島を対象としたインド洋大津波の再現計算を実施して津波水理量を推定し、サンゴ被害調査データとの定量的な比較分析を行うことで、サンゴ被害予測の可能性について検討した。

2. シミラン諸島のサンゴ被害概要

津波数値計算結果と比較する現地データとして、Phuket Marine Biological Center (2005) (以下、PMBC) と Chavanichら (2008) の、インド洋大津波後のサンゴ被害調査データを用いる。

PMBC (2005) では、タイ全土で行われたサンゴ被害調査のデータを取りまとめ、場所ごとの被害率で分類し、地図上に表記している (図-1 (a), (b))。被害程度は5段階に分類され、図中のI~Vはそれぞれ (I) “no impact (0%)”, (II) “very low impact (1~10%)”, (III) “low impact (11~30%)”, (IV) “medium impact (31~50%)”, (V) “high impact (51~100%)”を表している。これらの被害率データは、複数のダイバーにより目視判断で決定されているため、データの精度は後述のChavanichら (2008) と比べて低いが、全体的な傾向や被害の相対的な差などを読み取ることができる。PMBC (2005) で挙げられているシミラン諸島でのサンゴ被害の特徴として、2島間の海峡部、各島の北側、南側の突端で被害率が高いとされている。一方、島の西側では津波が直撃したにも関わらず、サンゴ被害はわずかであったとされる。

Chavanichら (2008) は、シミラン (Similan) 島とバナー (Bangu) 島の礁斜面に沿って6測線 (図-1 (a), ©1~6) を調査し、測線上のサンゴ被害を調べた。また、それら調査測線ごとの被害傾向を、礁斜面勾配の緩い測

1 学生会員 東北大学 大学院工学研究科
2 博(理) 東北大学助教 大学院工学研究科
3 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科

表-1 Chavanichら (2008) のシミラン島およびバーゲー島のサンゴ被害調査の測線名と被害率。測線番号は図-1 (a) の番号 (◎1~6) に対応。被害の欄は被害を受けたサンゴの種類。F:被覆状サンゴ, B:枝状サンゴ, T:テーブル状サンゴ, M:塊状サンゴ。

測線	地名	被害率	勾配	被害
1	Grandmother Rock	17.7%	急(1/3)	F,B,T,M
2	Snapper Alley Point	39.7%	緩(1/6)	B,T,M
3	North Point	20.0%	急(1/4)	B,T,M
4	Beacon Reef	7.2%	急(1/2)	B,T,M
5	Water Fall	20.4%	緩(1/13)	B,T,M
6	Christmas Point	18.3%	緩(1/10)	B,T,M

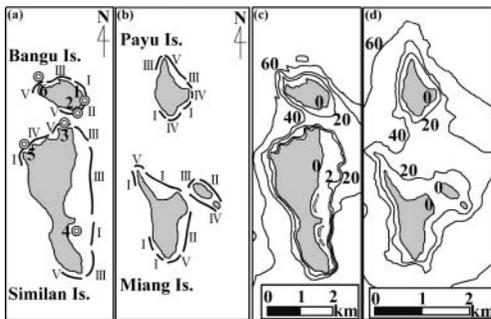


図-1 (a) 第5.1領域, (b) 第5.2領域のPMBC (2005) に基づくサンゴ被害率分布とChavanichら (2008) の調査測線位置 (◎1~6)。I~Vは各測線の被害率を表し, それぞれ (I) “no impact (0%)”, (II) “very low impact (1~10%)”, (III) “low impact (11~30%)”, (IV) “medium impact (31~50%)”, (V) “high impact (51~100%)” である。(c, d) 同領域の海底地形図。

線と急な測線に分類した。その分類によって、礁斜面勾配が緩い測線では急な測線に比べて被害程度が大きく (表-1), さらに特定の水深域 (水深10m~20m) に被害が集中する傾向があることから、礁斜面勾配がサンゴ被害率を左右する要因のひとつになっていると推測している。ただし、それに対する定量的な検討はされていない。Chavanichら (2008) は、各調査測線上に設置したテープ上で2m間隔に設定した測点に重なったサンゴの被害状況を記録している。PMBC (2005) に比べデータ量は少ないものの、質が高く、定量的なデータである。

3. インド洋大津波の数値計算

シミラン諸島周辺における津波流況を把握するために、インド洋大津波の再現計算を行った。計算領域は図-2に示す第1~5領域とし、第5領域は (1) シミラン島およびバーゲー島周辺, (2) ミアン (Miang) 島およびパユ (Payu) 島周辺の2ケースを設定し、それぞれ第5.1領域, 第5.2領域とした。広領域 (最大格子間隔:1分 (約1.8km)) から狭領域 (最小格子間隔:17.2m) へと計算格子間隔を変化させながら接続計算を行った。支配方程式は、第1領域では地球座標系の線形長波方程式を、第2

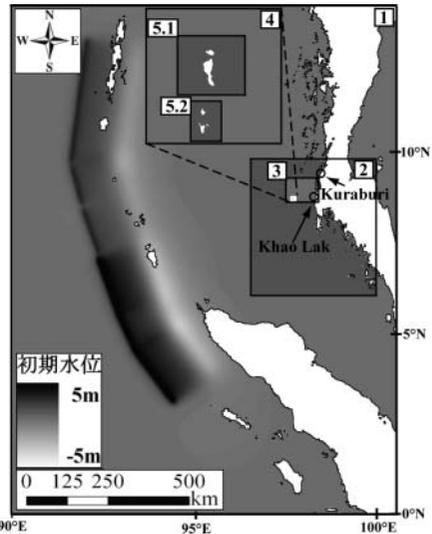


図-2 数値計算領域 (第1~5領域) と、インド洋大津波の初期水位分布

~5領域では陸上への遡上を考慮するため直交座標系による、非線形長波方程式 (浅水理論式) を用いた。断層パラメータには、対象領域周辺の津波流況を良好に再現しているSuppasriら (2008) を用い、Manshinha・Smylie (1971) に基づいて津波の初期波形を求めた。

4. 数値計算結果

(1) 数値計算の再現性の検証

数値計算の妥当性を検証するため、インド洋大津波の検潮記録の中で、シミラン諸島に最も近いクラブリ (Kuraburi) (図-2) での計算波形と、検潮記録を比較した (図-3)。その結果、第1波の到達時間、周期、波高を良好に再現できていることを確認した。次に、タイ・カオラック (Khao Lak) (図-2)、シミラン島、ミアン島のインド洋大津波後の津波痕跡高調査データ (松富ら, 2005; Choiら, 2005) と、算出されたそれぞれの地点の最大遡上高を比較した (表-2)。その結果、実測データでは最大10mの浸水高を記録したカオラックで11.0mの計算値、4.2mの浸水高を記録したミアン島では4.7mの計算値という、良好な再現結果を得た。一方、実測では6.0mの浸水高を記録したシミラン島では、計算値は4.0mと、2mの過小評価となった。シミラン島の痕跡高は、パンガローの外壁に残った水の跡であり (Choiら, 2005)、壁面での跳ね上げなどによる痕跡を記録した場合、真の浸水高より大きい値を採用してしまうことがある。シミラン島の痕跡高の再現性は直接示すことはできないが、タイ本土のカオラックと、ミアン島で良好な再現結果が得られたため、この再現計算は妥当であると考えられ、本計算結果を用いてサンゴ被害の検討を行う。

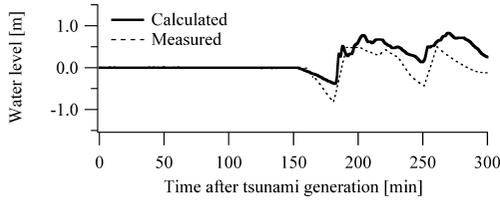


図-3 クラブリの検潮所における検潮記録と数値計算波形

表-2 インド洋大津波の浸水高の実測値と計算値

比較地点	実測値	計算値
カオラック	~10m	11.0m
シミラン島	5.9m~6.0m	4.0m
ミアン島	4.2m	4.7m

(2) 津波流況の時間変化

シミラン諸島へは、西側から引き波が最初に到達する。津波発生後80分ごろ、第5.1領域、第5.2領域それぞれで海面水位が低下し、西向きの流速が上昇する(図-4 (a), (b))。また津波発生後117分では、第1波押し波により周辺の水位が上昇し、東向きの流速が上昇する(図-4 (c), (d))。この時、各島の北端および南端、特に2島間の海峡部で流速が大きくなること示された。

(3) 最大波高、最大流速分布

図-5に、第5領域の最大波高および最大流速の分布を示す。第5.1領域では、シミラン島西側と東側の海岸および2島間海峡部の西側で最大波高が大きくなり、最大流速はバーゲール島北側、シミラン島南側、および2島間海峡部の東側で大きくなる。第5.2領域においても、最大波高はミアン島北側海岸(海峡部側)で、最大流速はバム島北側、ミアン島南側、および2島間海峡部で大きくなるため、最大波高、最大流速はそれぞれの計算領域で同様の卓越形態を持つことがわかる。海峡部では、水路幅が制限されることでの流れの集中、島の北端、南端では水深の浅い海岸線方向への波向き線の屈折による流れの集中により、最大流速が大きくなったと考えられる。また、シミラン島東側では押し波により上昇した水位が低下する際に、東側の水深の浅いリーフ地形(図-1 (c))から深い沖方向に流下する流れが生じるため、沖方向への最大流速が大きくなること示された。このような最大流速の卓越場所の分布は、PMBC (2005) で示された、津波によるサンゴ被害率が高い場所の分布と類似している。このことから、津波水理量とサンゴ被害率の間には相関関係が見い出せる可能性がある。

5. サンゴ被害と津波流況の比較

(1) 被害要因項目の検討

津波によるサンゴ被害の形態として、サンゴ群体の破壊、転倒、土砂の堆積、礁斜面の土砂崩れによる崩落が

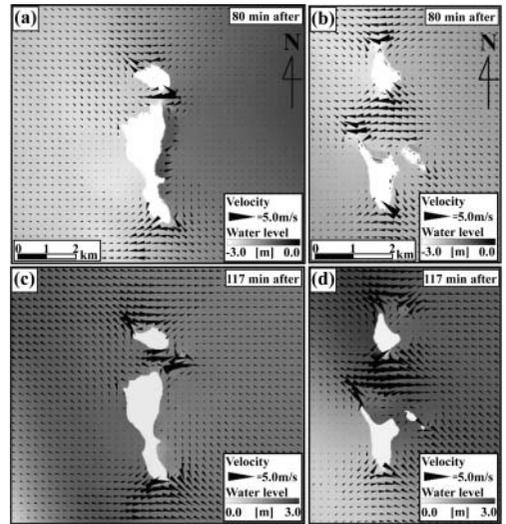


図-4 津波発生後80分、117分の(a)、(c)第5.1領域と(b)、(d)第5.2領域の流速ベクトルおよび水位の分布図。

挙げられるが(Chavanichら, 2008; Comleyら, 2005), 中でも破壊と転倒は、津波の流体力(抗力、慣性力、揚力)が大きく影響し、サンゴ群体に直接的な被害を及ぼすと考えられる。流体力の推定には、個々のサンゴ群体のサイズや投影面積、体積などの情報が必要であるが、これらの情報は現地調査から得られていない。そこで、抗力、揚力の主パラメータであり、数値計算によって推定可能な最大流速が被害を左右する主要因であると仮定して、考察を行う。また、底面境界層厚さは、本数値計算結果からサンゴのサイズに対して微小であると推定できるため、浅水理論式に基づき計算された、鉛直方向に一律な流速でサンゴ周辺の津波流速を検討しても問題ないと考えられる。

(2) 津波流況がサンゴ被害率に及ぼす影響の検討

図-6には、PMBC (2005) と Chavanichら (2008) の各サンゴ被害率調査測線上の、最大流速値(横軸)とサンゴ被害率(PMBCは被害率を0%, 1~10%, 11~30%, 31~50%, 51~100%の分類のみで表記しているため、その中央値を用いた)(縦軸)の関係をプロットした。その結果、最大流速の上昇に従って、サンゴ被害率の上昇傾向が読み取れる。特に、最大流速が4.5m/sを境として、それ以下では被害率は低い領域のみに集中しているのに対し、最大流速が4.5m/sを上回ると、被害率の幅が広がり、高被害率の場所も観察される。データ分布のばらつきは、全ての被害形態をまとめて“被害率”として扱っていること、流れの外力を流速で代表していることなどが原因だと考えられる。

(3) 礁斜面勾配がサンゴ被害率に及ぼす影響の検討

Chavanichら (2008) では、表-1のような調査測線ごとに生じたサンゴ被害率の差をもたらす要因として、各調

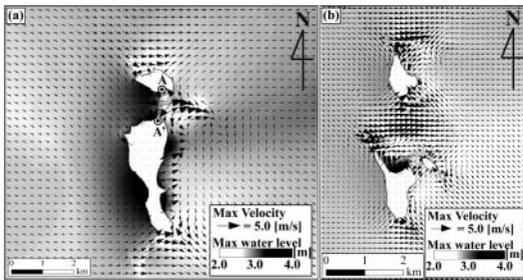


図-5 (a) 第5.1領域と (b) 第5.2領域の最大流速ベクトルと最大波高の分布図。区間AA'は図-7に示す最大流速抽出区間。

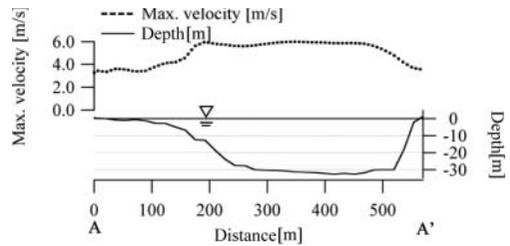


図-7 シミラン島, バーゲー島間海峡 (図-5 (a) の区間AA') の最大流速分布図。

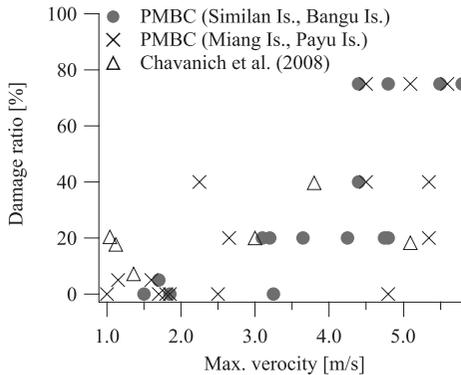


図-6 各測線の平均最大流速値と被害率 (共に測線上での中央値)。

査測線の礁斜面勾配の違いを挙げている。礁斜面勾配は津波の浅水変形に影響を及ぼすため、その違いによってサンゴ被害を左右する可能性がある。しかし、津波流況は局所地形効果によっても大きく変化するため、サンゴ被害率の差が礁斜面勾配のみで説明できるとは限らない。例えば、最も被害率が高いSnapper Alley Point (測線2) は緩勾配に分類される。この測線では10m~20mの水深で被害が大きいが、表-1から、この測線の勾配は全体で中間的な値のため、その原因を礁斜面勾配だけでは説明できない。一方、湾や海峡には流れが集中するため、同一の礁斜面勾配を持つ平坦な海岸に比べ流速、または波高が大きくなる場合がある。本研究の計算結果により、2島間の海峡部に位置する測線2は、最大流速が特に大きい領域に位置することが分かる。また、図-7は図-5 (a) に示すA点、A'点を結ぶ線の地形断面図および最大流速分布図である。同図から、A点側 (Snapper Alley Point側) の水深10m以深で最大流速値が増加していることがわかる。このことから、Snapper Alley Pointの水深が深い地点で特にサンゴ被害率が高いのは、海峡部での津波の流れの集中に伴う最大流速の増加が原因だと考えられる。

6. 津波直後のサンゴ被害調査手法の提案

(1) 被害推定について

本研究では、インド洋大津波に伴うサンゴ被害調査データと、津波数値計算結果を比較することにより、津波によるサンゴ被害の大局的な傾向は数値計算によって推定可能であることを示した。しかし、本研究で用いたサンゴ被害率のデータは、複数ある被害形態を総合した被害率である。本来、被害形態によって生じる物理的なプロセスが異なるため、それぞれ異なった被害発生基準を用いて検討を行うべきであるが、入手できる調査データによって、数値計算による検討の可能性が制限されたという問題がある。これは、津波直後にどのようなサンゴ被害データを収集すればよいか、サンゴの専門家間で事前に想定されていなかったためと考えられる。

入手できるデータが定量的評価に適用可能なものであれば、新たな検討手法を導入することができる。将来、流体力を考慮した詳細なサンゴ被害評価を行うために、今後津波直後の調査を行う際に、以下に示すような流体力算定の材料となるデータを収集することを提案する。

(2) 付着面からの剥離、転倒したサンゴの調査例

表-3は、サンゴ群体全体が付着面から剥がれた群体の調査を想定した記載例である。サイズ、体積等の算定にはサンゴ群体の詳細な計測が望ましいが、調査の効率化を考慮し、塊状サンゴなど、楕円体に近いものはその3方向長さを、テーブル状サンゴは傘部直径、莖部直径、高さなど、群体の特性を代表する値を計測する。また、調査後に寸法、形状等のデータを整理するため、各群体のスケールがわかるような写真を水平方向、鉛直方向など、複数方向からの写真を撮るのが望ましい。サイズの小さいサンゴは、津波によって長距離流され、生息していた地点と、発見された地点が異なる可能性があるため、比較的大きく、移動距離が小さいと考えられるもの (分布するサンゴの状況から、長軸1.0m以上のみ記録、など基準を定める) を記録する。土砂堆積、サンゴ群体の部分的破壊 (例: 枝サンゴの折れ) など寸法が影響しないと考えられる被害形態については、寸法の記録は省略し、被害形態のみを記録する。以上の情報をGPS等を用いて

表-3 定量的評価を想定した、サンゴ被害調査の調査項目と記入例。

No.	サンゴ種類	経度	緯度	寸法1	寸法2	寸法3	付着面
100	塊状サンゴ	8.65°E	97.65°N	長軸 2.2m	短軸 1.8m	高さ 2.0m	80cm × 60cm 楕円形
101	テーブル状サンゴ	8.66°E	97.66°N	傘直径 2.1m	茎直径 0.5m	高さ 0.5m	50cm × 50cm 円形
102	塊状サンゴ	8.67°E	97.67°N	長軸 1.5m	短軸 0.8m	高さ 0.8m	不明
103	テーブル状サンゴ	8.68°E	97.68°N	土砂堆積	—	—	—

位置情報（緯度，経度）とともに記録することにより，数値計算により各サンゴの位置での津波流況を推定し，サンゴ群体にかかる流体力を算定することで，より定量的なサンゴ被害の評価が可能になると考えられる。

(3) 調査個体数の設定

数値計算の計算精度を満足し，なおかつ被害調査の労力を考慮し，礁斜面に直交させて設定した調査測線上で，5～10mおきに1個，長さ200mの測線で20個ほど記録する。ただし，特に大きい群体の被害が見つかった場合なども記録する。

7. 結論

本研究によって得られた結論を以下に示す。

- (1) インド洋大津波の再現計算により，シミラン諸島における津波流況は，地形条件による流れの集中，屈折により，島の北端，南端および海峡部で特に最大流速が卓越することがわかった。
- (2) 数値計算結果と既往のサンゴ被害調査データを比較する事により，最大流速の増加に伴ってサンゴ被害率が上昇する傾向が見られ，数値計算によって津波によるサンゴ被害は大局的には推定可能であることがわかった。
- (3) サンゴ被害を左右する要因として，礁斜面勾配だけではなく，局所的な地形条件による流れの変化が影響していることがわかった。
- (4) 津波によるサンゴ被害推定をより詳細に行うためには，被害形態ごとに適した物理過程を考慮し，被害調査において適切なデータを収集する必要がある。
- (5) サンゴ被害推定に必要なデータを確実に収集するために，サンゴ被害調査者への調査項目の提案を行った。

謝辞：本研究は，科学研究費補助金（代表：今村文彦，基盤研究（A）：課題番号18201033）ならびに東北大学グローバルCOEプログラム「変動地球惑星学の統合教育

研究拠点」からの研究助成金を使用して行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 藤間功司（2005）：モルディブにおけるインド洋津波の特性，津波工学研究報告，Vol.22，pp.103-109.
- 松富英夫・高橋智幸・松山昌史・原田賢治・平石哲也・SereeSupartid・Sittichai Nakusakul（2005）：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.
- Anawat, S., F. Imamura and S. Koshimura（2008）：Comparison among the proposed models for the 2004 Indian Ocean tsunami, 平成19年度東北支部技術研究発表会概要，II-53.
- Chavanich, S., A. Siripong, P. Sojisuoporn and P. Menasveta（2005）：Impact of Tsunami on the seafloor and corals in Thailand, Coral Reefs, Vol.24, No.4, pp.535.
- Chavanich, S., V. Viyakarn, P. Sojisuoporn, A. Siripong and P. Menasveta（2008）：Patterns of coral damage associated with the 2004 Indian Ocean tsunami at Mu Ko Similan Marine National Park, Thailand, Journal of Natural History, Vol.42, Issue3/4, pp.177-187.
- Choi, B. H., A. Siripong, V. Sundar, J. Wijetunge and S. Diposaptono（2005）：When the sea strikes back : the December 26, 2004 earthquake tsunami of Indian Ocean - post runup survey, Workshop on Indonesia Ocean Forum 2005 and the 13th PAMS/JECSS Meeting, Bali.
- Comley, J., S. O'Farrell, S. Hamylton, C. Ingwersen and R. Walker（2005）：The Impact of the December 2004 Indian Ocean Tsunami on the Coral Reef Resources of Mu Ko Surin Marine National Park, Thailand, Coral Cay Conservation.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie（1971）：The displacement fields of inclined faults, Bull. Seism. Soc. Am., pp.1433-1440.
- Phongsuwan, N. and B. E. Brown（2007）：The influence of the Indian Ocean tsunami on coral reefs of western Thailand, Andaman Sea, Indian Ocean., Atoll Research Bulletin, Vol.544, pp.79-91.
- Phuket Marine Biological Center and Department of Marine and Coastal Resources, Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand.（2005）：Scientific Forum on the Tsunami, Its Impact and Recovery, Pathumthani (poster).
- Satapoomin, U., N. Phongsuwan and B. E. Brown（2007）：A preliminary synopsis of the effects of the Indian Ocean tsunami on the coral reefs of western Thailand, Phuket Marine Biological Center Research Bulletin, Vol.67, pp.77-80.
- United Nations Environment Programme（2006）：After the Tsunami: Rapid Environmental Assessment.