

**Scheffers, A., Brill, D., Kelletat, D., Brckner, H., Scheffers, S. and Fox, K., 2012,
Holocene sea levels along the Andaman Sea coast of Thailand. The Holocene, 22(10),
1169-1180.**

タイのアンダマン海の海岸沿いの完新世海水準

要約

マレー・タイ半島に関しては、ファーフィールドのハイドロアイソスタシーモデルと野外の証拠から、中・後期完新世の海水準曲線が公表されている。一般的な想定では中期完新世までの、現在より最大5m高い海面への急速な上昇の後、一定または小さい変化を伴いながら海退した。しかし、2004年の津波に襲われたタイのアンダマン沿岸では、完新世の海水準変動に関するものは、孤立した(isolated)観察のみである。それゆえ、完新世の海水準高位期の時期と海水準、そして、海退の状況はまだ確定していない。中期完新世以降、複数の古津波が見つかっており、これらの津波のエネルギーや浸水の幅、そして波高の見積もりを正確にするには、海水準変動を知ることが重要である。したがって、Phang-nga湾とプーケットの岩礁から、固着した生物示標と西海岸沿いに発達する浜堤と低湿地の地形的示標を研究し、この地域の完新世の海水準変動の歴史についての情報を得た。Phang-nga湾とプーケットから採取したカキやサンゴのデータは完新世の海水準の最高位期は5700年前で+2.6mだが、研究地域の北西の浜堤の頂部と湿地の基底は、約5300年前に現在より最大で1.5~2.0m高かったことを示す。最近3000年間で、タイの完新世の最大の古津波堆積物の起きた時には、相対的海水準は両地域とも現海水準よりも1.5m高いことはなかった。

序論

2004年12月のインド洋津波(IOT)の結果、インド洋津波の影響のあった場所において完新世の津波の歴史に関する多くの研究がおこなわれた(e.g. Brill et al., 2011; Dahanayake and Kulasena, 2008; Jankaew et al., 2008; Monecke et al., 2008; Rajendran et al., 2006)。タイ南部の西海岸に沿って、インド洋津波の堆積物の証拠となる

砂質堆積物や巨礫が Ko Phra Thong の浜堤から, Ban Bang Sak (Brill et al., 2011), Pakarang (Neubauer et al., 2011), そして Thap Lamu の沿岸平野(Rhodes et al., 2011; Yawsangratt et al., 2009), Phang-nga 湾の洞窟(Harper, 2005)から報告されている. これらのイベントで最も古いものは Pakarang 岬(Neubauer et al., 2011)のもので 5000 年以前の年代だが, タイの多くの証拠は最近 3000 年間に少なくとも 4 回津波が起こったことを示す.

津波堆積物(砂層あるいは巨礫)と他の強い波のイベント, 例えば高潮—これも津波堆積物と似た堆積学的証拠を残す(e.g. Morton et al., 2007; Switzer and Jones, 2008; Tuttle et al., 2004)—と区別するため, そしてそのイベントの規模を推定するには, その衝撃が起きた時の海水準を知ることは重要だ. 潮位差の小さい地域では津波の浸水は, ほぼイベントのエネルギー, 地形, 相対的海水準に依存し, 大きな潮の満ち引きのエリア(潮位差が中から大の場所)では津波の時の潮位もまた重要である.

最近数1000年間では, 相対的海水準と潮位差は現在の値とかなり異なるかも知れないので, 相対的海水準と潮位差は, 波のレベルや流れの衝撃に数mもの違いを生み出すかもしれない. 津波発生時の潮位や潮位差の計算は不可能だが, 過去の海水準は地形学的, 生物学的, 考古学的示標を用いて, 最高±20年, ±5cmの誤差の精度(Milne et al., 2009; Yu et al., 2009)で再現できる. そして復元された海水準変動曲線は, 年代測定の誤差や示標の高度に関する誤差がある. 潮位差の小さい南西タイの海岸では, 海水準変動曲線は, 津波堆積物の到達した最大高度の情報の提供によって, 古津波のエネルギーの解明の一助となる.

フィールドの示標から得た海水準曲線は複数の要因の相互作用のプロセス(e.g. Gehrels, 1999; Pirazzoli, 1991)によってコントロールされた局地的な相対的海水準変動を反映する. 一般的に, 低緯度の大陸の海岸における完新世の海水準変動は, 主に, 氷床の融解による水の海への移動, ハイドロアイススタシーによる大陸棚縁辺の低下, ジオイド的海水準変動によって決定される(Mitrovica and Milne, 2002; Mitrovica and Peltier, 1991; Peltier, 1999, 2002; Woodroffe and Horton, 2005). しかし, 地域的には, 相対的海水準変動の傾向が構造

運動、堆積物の圧密のような局地的現象の影響を受け、むしろそれらが支配的ですからある (e.g. バングラディッシュでは, Islam and Tooley, 1999). タイ南西部は、構造的に安定で、他の局地的要因も私たちの研究サイトではわずかであると推測されるので、氷河性海水準変動やハイドロアイソスタシーやジオイド的な海水準変動の相互作用が完新世の相対的海水準変動を支配している (Horton et al., 2005). 後氷期の氷の融解による急速な相対的海水準の上昇が起き (Hanebuth et al., 2000), 現在の相対的海水準変動よりも数m高い位置に海水準は達した. この海水準のピークの後には、ほぼ連続的に海水準は低下し (アイソスタシー的リバウンドと海洋サイホン効果), これらの要因の空間的相違が高海水準期の海水準の高さと時期の地域差を生んだ. しかし、津波堆積物の解釈の重要性は、もっぱらその発生における相対的海水準の高さである. それゆえに、本研究の主な狙いは完新世で最も海水準が高くなった時期とその高度、さらにその後の海水準低下を復元することであり、海水準変動を支配するプロセスを決定することは本研究の趣旨ではない.

マレー半島沿いの完新世の海水準

タイではGPSで補正した潮位のデータと人工衛星からの正確な海水準の測定は、最近の数10年間限定的であった (Trisirisatayawong et al., 2011). 測定される前は、海水準はフィールドの証拠やモデル (たとえば氷河性海水準変動による調整モデル (GIA), e.g. Mitrovica and Vermeersen, 2002) によって復元されていた. マレー半島を含む西インド洋地域、そしてインド - 太平洋地域 (Camoin et al., 1997, 2004) のほとんどでは相対的海面水準が現在よりも高かったという証拠は見つかっていない. これは氷床から遠く離れた地域の典型的な海水準変動のパターンである (Bradley et al., 2008; Mitrovica and Milne, 2002). しかし、海水準は中期完新世まで急激に上がり、最高位に達し、その後現在の海水準まで低下している (Woodroffe, 2009; Woodroffe and Horton, 2005). しかし、融解した水の流入、ハイドロアイソスタシー、ジオイドアイソスタシーのため、海水準高位期の時期や海水準の高さは場所によって異なる (Horton et al., 2005; Woodroffe, 2005; Zong, 2004).

マレー・タイ半島では、中期完新世の最も高い海水準は、既にマラッカ海峡(Geyh et al., 1979; Hesp et al., 1998), マレーシア(Tjia, 1996), そしてタイ(Sinsakul et al., 1985, 1992)の地質学的なフィールド調査の証拠から示されていた。しかし、完新世の海水準高位期、海水準の高さ、そして高位期の数にはかなりのばらつきがあった。タイ南部(タイとアンダマン海岸の入江)の海岸の海水準は 6000 年前に現在より最大 4m 高く、4000 年前には現在より 2.5m 高く、2600 年前には現在より 2m 高かったことが、Tjia (1996)と Sinsakul (1992)によって推測されている。しかし、これらの研究で用いた海水準の示標はかなり広い高度の範囲をもつことを考慮すると、そのデータは、正確な海水準曲線の復元には不十分である(Horton et al., 2005; Woodroffe and Horton, 2005)。最近行われた海水準曲線の復元は、信頼のおけるフィールドの調査(Choowong et al., 2004; Horton et al., 2005; Scoffin and Le Tissier, 1998)とモデル結果(Horton et al., 2005)に基づいており、完新世では 1~5m まで 1 回の高位期があり、マレー半島では、現在の相対的海水準に向けて徐々に海面が低下したことを示した。ハイドロアイソスタシーの影響は有意な地域差をもたらしたので、それぞれの相対的海水準曲線は小さな地理的なエリアだけで有効である。研究地域(タイ南西部)の海水準変動の詳細な復元は、主に GIA モデルに基づき、約 6000 年前に現在より 2~3m 高かったことを示す(Horton et al., 2005)。タイ南西部で得た信頼のおけるフィールドの証拠は、南西プーケットからの潮間帯の礁平原のサンゴであり、最近 6000 年間に、現在の海水準まで少なくとも 1m 徐々に低下したことを示す(Scoffin and Le Tissier, 1998)。しかし、潮間帯の礁平原のサンゴは 11 個試料あるが、海水準の最低値しか与えないので、完新世の最も海水準の高い時期や高さのモデルの有効性を確認することはできない。

セッティング

タイ南部のアンダマン海岸(9° ~ 7° 30N)はマレー・タイ半島の一部で、浸水し、浸食された南北に伸びる山脈がある。構造的に、この地域は比較的安定したスダプレートに位置し、その西の地震活動の活発な地域に比べて完新世の間、構造運動はほとんどなかった

(Dheeradilok, 1995). この地域の西は、スンダ Arc 沈み込み帯で、地震や津波の主な発生源となっている。タイ南西部は、湿気が多い熱帯地域で夏季モンスーンの際に大雨が降り(2500~3000mm/yr)、12月から2月が乾季で、密集した植生とかなり発達した土壌(岩盤上のラテライトや浜堤上のポゾドル)が特徴的な景観である。

通常の海岸の状況は、ほぼ1日周期の潮汐によってコントロールされる(Admiralty Tide tables, 2003)。Phuket Royal Marynaにある検潮所において2010年のデータから春の大潮の最大潮位差は2.82mで小潮の潮位差は0.40m、平均潮位差は1.55mと計測された。平均海水準は月の引力による引き潮の最低の高さよりも2.02m高い位置に設定した。0.3m以下の年々差や季節差は地域にとって典型的で、海水準の復元の精度には重要な影響は与えない。波は一般的に2m未満の中程度である(Choowong et al., 2008)。特にPhang-nga湾の静かな地域では、生物がつくるほぼ水平なベンチの形成を促進する。沿岸の形成に重要な影響を与えるより高いエネルギーの状態は、夏季モンスーンに普通である。しかし、熱帯サイクロンは最近150年間でタイ南部の西海岸で記録されていない(Murty and Flather, 2004)。

Ko Phra Thong からプーケットの砂州北部までの研究地域の北部は、堆積物の海岸であり、砂浜、潮汐平原とバリアー島で特徴づけられる(Sinsakul, 1992)。台風進路からは外れており(Murty and Flather, 2004; Singh et al., 2000)、貿易風の風下にさらされているが、浜堤システムがこの場所の特徴的な要素だ。特に、プーケットから北へ125 kmのPhra Thong 島は潮流口によって本島から離れており、海岸に平行な浜堤と湿地が卓越する(Figure 1b)。

対照的に、研究地域の南部は岩礁海岸である。しかし、プーケットの海岸は花崗岩の岬と岬の間に砂浜があるのに対して、プーケットの東のPhang-nga湾の島はペルム紀の石灰岩によって構成されている(Watkinson et al., 2008)。一連の島だけでなく島々の空間パターンは、南北方向の構造を示す(Tjia, 1996; Watkinson et al., 2008)。長く続く熱帯のカルスト化は石灰岩をカルストの塔に変え、その塔は海に囲まれ、急斜面となっている。これ

らの島はよく発達したカレン(石灰岩が溶けてできる溝), 竪穴, 鍾乳石や洞窟のようなカルストの特徴がみられる. そして, 洞窟は島の中央にあるほぼ垂直で深い穴で海とつながり, これを地元では hong と呼んでいる. hong の外側にさらされた崖とは対称的に, シンクホールの波の影響はほとんどない. 北部からの川の堆積物の流入のために, Phang-nga 湾の内側は, 三角州や干潟のような海岸の埋め立てで特徴づけられ, マングローブ林に覆われている. 海図は Phang-nga 湾の内側の深度 5~10m の浅瀬が以前の河道に沿って水深が増加する一方, ピピ島周辺の南端では水深 20~30m の海が海岸のすぐ近くまで迫っている. その結果, アンダマン海からの波の影響はより強く, 砂浜がより広がっている. 淡水の流入と懸濁物が減少するので Phang-nga 湾の南部では頻繁にサンゴ礁がみられる.

海水準の示標

この研究では, 過去の海水準と潮位の証拠のため, 二つの異なった示標のグループを調査した. (1)岩礁の波にさらされた場所や遮へいされた場所に固着した生物示標, (2)浜堤平原の地形的な示標. 海水準復元にしばしば使われる微化石や花粉(Engelhart et al., 2007; Gehrels, 1999; Horton et al., 2003, 2005, 2007; Scott and Medioli, 2005; Van de Plassche, 1986), 海岸泥炭(Brückner et al., 2010; Gehrels, 1999)や考古学的示標(e.g. Devillers et al., 2007; Orhange et al., 2001)といった他の種類の証拠は, 南西タイの沿岸のアーカイブでは失われている.

固着した生物示標

TomanekとHelmuth (2002)が述べたように, 岩礁の潮間帯は地球上で最も厳しい物理環境にある. この環境で生きている海の無脊椎動物や海藻は波にのまれ, 干潮時には厳しい乾燥にさらされる. それに加え, 捕食や生存空間競争のために, 強い選択圧を受ける. その結果, 急な物理的勾配と空間的に濃縮した群集は, 潮位レベルに関連した生物の分布の研究のための理想的な天然の実験室である岩礁性潮間帯を生む(Baker and Haworth, 2000; Baker et al., 2001; Coates, 2008; Kelletat, 1997; Laborel and Laborel-Deguen, 1994, 1996,

2005; Pirazzoli, 2005; Stephenson and Stephenson, 1949; Tomanek and Helmuth, 2002). 一般的に海岸の勾配が急になるほど、そして、岩の表面の種類が少なくなればなるほど、分布パターンをより明確に輪郭を描くことができる。プーケットとPhang-nga湾の石灰岩と花崗岩の海岸に沿って、生物の浸食したノッチ、岩ガキのベンチ、二枚貝やウニが穴をあけた帯やサンゴ礁のコロニーが存在する。これらは最近の形成だけでなく、以前の活動によっても作られているので、タイ南西部にとって過去の海水準の正確な決定に用いられる(Figuer 2).

これらの生物示標と潮位の関係は一般的な同意がなかった。しかし、信頼のおける海拔は、同じ場所の現世の生物示標との比較によって明らかにされた(Pirazzoli, 2005)。多くの場合、生物浸食によるノッチは波のあたる場所にいる生物によって形成され、潮位の最大範囲の良い情報を与える(Kelletat, 2005)。研究地域の現世のノッチは、平均低潮線の位置に海面がある時は全部露出しないが、ほとんどは1m水没しているので、ノッチの基底を平均低潮線の示標として扱う。Laborel と Laborel-Deguen (2005)は、穴をあける二枚貝(*Lithophasa* sp.)とウニを、誤って、LLWより下の潮下帯としたが、Phang-nga湾に住むウニと穴をあける二枚貝はMLWの直下(±20 cm)から見つかった。カキやサンゴの個々の帯状分布は議論の余地はない。岩ガキ(*Saccostrea cucullata*)の密集したベルトの上限は、平均高潮線(MHW)の±10cmの示標とした。サンゴの群体はMLWで最も成長するので、よって過去の海水準の最低値の示標を提示する(Figure 2a)。

地形的な示標

堆積性の海岸は、過去の相対的海水準の独立したアーカイブをあたえる。Ko Phra Thongの浜堤と低湿地の説明は、過去の相対的海水準変動に関する代替を意味しているとみなされ、それは以下の議論に基づく(Figure 2b)。

(1)浜堤は内部構造を見ることができ、それは少なくとも浜堤の頂部に達する波、たいていの場合、浜堤の頂部をこえる波によって浜堤は作られる(Otvos, 2000; Taylor and Stone,

1996). 1つの浜堤は通常の波より高い波によって形成され、浜堤の頂部は春の大潮よりも数10cmから数mの高さに形成される(SpTHw)(Otvos, 2000; Scheffers et al., 2011). 浜堤の底は一般的にほぼMHWの潮間帯より上から始まるが、隣の浜堤との間隔によっては、わずかに上下する。

(2)もし堆積物の供給が十分ならば、浜堤は海へ向かってほぼ連続的に付加され、浜堤と低湿地を形成するが、浜堤の形成のサイクルは、小規模な海水準変動としばしば起こる嵐の衝撃あるいは堆積物の供給によって説明される。密集した間隔の浜堤の間の湿地はかなり狭い。この場合、湿地の底の海拔は、MHWかやや高い場所にあるべきだ。より幅の広い浜堤の底はMLWと同様の深さのところにある(Taylor and Stone, 1996).

(3)ここ100年そして1000年間の浜堤の頂部は、最初の高さからある程度低くなっている。これは強い雨、嵐のオーバーウォッシュや津波による。一方、これらのプロセスによる堆積物と泥炭質土壌の有機物によって湿地は埋められている。Phar Thong島で、浜堤の頂部の浸食は、特別にポドゾルの発達する場所での有機物の集積層の欠如によって示される。しかし、低湿地の底は数10cmの厚さの泥炭土壌と津波堆積層によって覆われている。

浜堤の頂部の高さは、海水準を決定するにはあいまいすぎるので、浜堤の頂部の高さは現在のバーム(前浜と後浜の境界)に対する位置でのみ解釈した。その代わりに、かなり狭い湿地の底はMHWの±0.5mの示標とした。±0.5mの精度はかなり伝統的な値である(Figure 2b).

方法

タイ南西部の海水準曲線を確定するために、すべての代替示標のある点を潮位に関連付けた。これに関して、主に二つの異なる方法を使うことができる。1つ目は潮位のデータから潮位を求め、正確な位置と気圧に関して補正し、測定中の正確な海水準に代替示標の海拔を求めることだ。波による妨害がなければ、年々変動、季節差による潮位変動内の10~20cmの正確さで海拔を求めることができる。2つ目のアプローチは特定の潮位に正確

に対応する重要なマーカーに代替示標を関連付けることだ。研究地域の岩礁沿いは、このようなマーカーとして常に MHW の±10cm に岩ガキの生息帯の最上部があるので、生物学的な海水準示標の高さを決定することに使える。水準測量は、測量棒を使って短時間でほぼ垂直方向で行ったので、誤差はほとんどない。Phar Thong の堆積性海岸は、安定した海水準のマーカーはなく、GPS(Leica SR 530)を用いた水準測量で第一のアプローチと同じことになる。湿地の底の高さを測るために、陸上堆積物の厚さ(津波堆積物と泥炭)を多くの湿地で測り、表面の高さから引いた。

高度を測定した代替示標の年代を決定するために、3つの異なる年代測定方法が適用された。(1)生物浸食のノッチから得た鍾乳石の U/Th 年代をヘイデルバーグ大学で測定した。(2)サンゴ、軟体動物、有機物の年代をベータアナリティック社と Georgia 大学(Athens)で放射性炭素年代測定で決定した。海洋リザーバー効果は Southon et al. (2002)の $\Delta R = -2$ を適用する。すべてのデータは、Reimer et al. (2009)の Marine09 と IntCal09 を使って、標準偏差 2 シグマの暦年代に換算した。(3)浜堤や湿地帯からの海岸の砂の年代測定のために、光ルミネッセンス(OSL)テクニックを採用した。これは一般的に浜堤平野の年代決定に用いられる。OSL サンプルの準備や測定は、本研究と同じ場所の海岸堆積物について測定した Brill et al. (2012)の記載した方法で行った。

このサンプル処理は、弱い赤色光の下で行った。炭酸塩、有機物、粘土を取り除くために、乾燥したサンプルはふるいにかけて、HCl、H₂O₂ やシュウ酸塩の処理を行った。純粋な石英を得るために、堆積物は重液で分離され、高濃度の HF で溶かした。測定は ⁹⁰Sr/⁹⁰Y ベータ線を有する Ris TL/OSL DA 20 で行った。青色 LED の 50 秒間 125°C の温度で刺激した後、Hoya U340 フィルターを通して、ルミネッセンス信号を検出した。等価放射線量は、Murray と Wintle (2000, 2003)の SAR プロトコルに従った。熱前処理とルミネッセンスの特徴の効果は、プレヒートのプラトー、熱転移、ドーズリカバリーテストで確認する。平均等価放射線量は、中央年代モデルで計算する。放射線量は試料のカリウム、トリウム、ウラン濃度、そして水分量から、ADELE ソフトウェアを用いて計算した。

結果

図 1 に、この研究で扱った海水準の示標の位置を示す。プーケットの南東の Phi Phi 島と Phang-nga 湾の奥の Ko Hong, Ko Pha Nak の周囲の諸島, Kamala 海岸(プーケット)の南端の Laem Son 花崗岩の岬そして Phra Thong 島の浜堤シーケンスである。

岩礁海岸における完新世の海水準の証拠

Leam Son (Kamala Beach)

プーケットの西海岸は、花崗岩の岬と狭い砂質の浜辺のある湾によって特徴づけられる。Laem Son は Kamala Beach の南の岬である(Figure 1d)。その北の砂州(Kamala Beach の南端)では堅い花崗岩と海側に傾斜する凸凹した斜面は大きな岩に覆われている。花崗岩の大岩の間には、サンゴの巨礫と生息姿勢を保ったまま死んだ小さいサンゴ(主に *Porites lutea*)がある。現在、これらの現地性のサンゴは、生きているサンゴの最も高い位置(MLW)よりも上にある。その薄い外層は周囲の巨礫にくっついていて、ほとんどは緑藻で覆われ、ワームや小さなカニによって穴をあけられている(Figure 3c,d)。現地性のサンゴの遺骸の 9 つのサンプルのすべては一最も低い位置にある試料は MHW より 1.36m 下で、最も高い位置にあるものは MHW より 0.6m 上から採取された(Figure 3a, b)一暦年代で 530-373 年前から 6877-6618 年前の年代が得られた(Thai11-14-22, Table 1)。1.6m の潮位差を考慮すると、代替示標の位置は MLW より 0.24 から 2.20m 上にあるので、6800 年間における現在より高い海水準は 4700-4400 年前にあり、最大は少なくとも+2.20mであることを示している。

Phang-nga 湾

Phang-nga 湾は石灰岩の島で、そこの険しい海岸は生物浸食と生物学的構造物(カキ)で特徴づけられる。最も印象的な形は水平なノッチで、これはラン藻類や緑藻類を食べるカサガイ、ヒザラガイ、他の腹足類(さらに微小生物)の生物浸食の結果である。現在最も低い位

置のノッチのみが形成中である。最も高いノッチは、現在形成中のノッチよりも深くへこんでおり、しばしば良く発達した平らな天井、洞窟の開口とその床上に見られる厚いフローストン、そして直径 3m 以上の鍾乳石のカーテンが観察できる。開かれたノッチでは鍾乳石が形成され、それらは常に波の到達するよりも上に形成される(海水中に水没しても溶けないが、微生物や二枚貝に穴をあけられる)ので、垂れ下がる鍾乳石の下限は海水準の示標になるかもしれない。

(1)Ko Pha Nakの東海岸(KPN (E), Figure 1e)には、異なった高さの3つのノッチが発達している。上位のノッチは、MHWより上2.50-4.50mにあり、10m以上へこんでいる。その床は厚いフローストンに覆われ、発達した鍾乳石は外からノッチを隠すほどである。二枚貝の穴は壁面と天井を覆っており、MHWより4.5m上にある。真中のノッチはMHWより2m上にあり、上位のノッチと現在形成中のノッチよりもへこんでいない。最も高いノッチの内側から得た石筍のU/Th年代は19000±1300年前のものである。異地性の軟体動物の殻の年代は暦年代で36,759-34,500年前である。また石灰岩の崖にある垂直な割れ目の中にある異地性の軟体動物の¹⁴C年代は暦年で49,026~44,848年前である。MHWより1m上の別の割れ目で見つかった現地性のカキは、暦年代で2282-2052年前の年代が得られた。1.60mの潮位差とすると、より高い海水準の高度は上位のノッチ(その底の高度はMLWより高い)から+4.10±0.5m、二枚貝の穴から+6.10±0.2m、そしてカキから+1.0±0.1mと推定された。

(2)Ko Pha Nakの堅穴では、現在形成中のノッチより高い場所にはノッチはない。しかし、堅穴内の遮られた場所には、死んだ現地性のカキが、生きているカキのベルトより3m上に分布している。MHWより上0.85mから2.6mの間で採取された合計5つのサンプルは暦年代で1256-1083と5845-5605年前の間の年代で、最も海水準の高い時期は暦年代で5850-5600年前であり、海水準は現在よりも2.60±0.10m高かったことが示された。

(3)Ko Na Khae(Figure 1eのKNK)の北部海岸に沿って、狭い海浜が石灰岩の崖の前に形成されている。ここでは上位のノッチはMHWより3.50から4.90m上に達している。ウニのあけた穴はMHWより1.30m上の崖まであり、一方、二枚貝のあけた穴は最も高いものは、上

位のノッチの天井(MHWより4.9m上)で発見された。MHWより1.5m上の現地性のカキ (*Saccostrea cucullata*)は垂直の割れ目に隠されていて、暦年代で3830-3631年前の年代である。1.60mの潮位の幅を考慮すると、ノッチは、現在より高い海水準は+5.10±0.5mまでで、二枚貝の穴は+6.50±0.2m、ウニの穴は+2.09±0.20mそしてカキは+1.5±0.1mを示す。

(4)Phi Phi島の隆起ノッチは、海岸のいくつかの場所で見つかったが、現在形成中の生物の構造物以外のものはない。Maya海岸の1つのサンゴだけMHWより1.5m上にあり、石灰岩の崖の割れ目から採取され、暦年代で28,000-26,910年前の値が得られた。他の種類のより若い時代の海水準示標は、Phi Phi Donの西海岸の砂岩に発達したほぼ水平のプラットホーム(幅約6-7m)によって示された。そのプラットホームはMHWに近く。MHW上1m以内で蜂の巣状の風化と小さなタフォニ(虫食い状の風化)が発見された。

Ko Phra Thongの堆積性海岸での完新世の海水準の証拠

Phara Thong島は、ほぼ平行の浜堤と湿地の連なり、時折、浸食イベントによって切れている。東部では、これらの構造はマングローブや密集した植生、草の多い浜堤や湿地で覆われているが、島の西では2.5~3kmの幅の開けた浜堤が広がっている。この浜堤平原の北部で、海岸に直交する4本の横断線で水準測量を行った。その年代測定は、浜堤と湿地帯の底の潮間帯の砂の合計13のOSLサンプルに基づいた。さらに湿地帯の底の泥炭土壌から得た3つの有機物の¹⁴C年代を測定した。さらにPrendergast et al. (2012)のOSL年代も入手した。

Figure 5はTransect Aの結果で、東から西に向かって5300±500年前から1600±200年前へと年代が新しくなり、年代の逆転はない。浜堤の高さ(MHWより3.30から1.50m)と湿地帯の底の高さ(MHWより2.30から1.15m)は海に向かって減少傾向にある。Transect Cの中では1つの年代値(KPT32)は逆転しているが、Transect BとCの傾向は似ており、KPT24, 25そして26のかなりの不確かな年代のため、Transect Dでは、はっきりした傾向がない。

議論

海水準示標の年代

ウニの穴と二枚貝(*Lithophaga*)の穴は、MSLより約4.5-5.0m上で発見され、それらはカキの生息ベルトの直上でもあり(MHWからその上+0.90mまで)、海水準が現在より確実に高かったことを示す。また、生物浸食のノッチは海水準が現在より3.50-5.50m高いところにあることを示すが、かなり破壊されており、また年代を直接測ることができない。厚いフローストーンと直径3mにも達する良く発達した石筍から相対的年代が推測でき、上位のノッチに関しては完新世以前と推測される。完新世以前の長期間の海水準高位期は、上位のノッチの深い切れ込みによっても支持される(奥行き10mまで(Figure 4c, d)より深い洞窟が島の中へ向いている)。孤立した場所になごりとして保存された中間のノッチは、浸食されたものと思われる。それゆえに中間のノッチは3つの中で最も古い。少なくとも最終間氷期(おそらく、さらに古い間氷期)の海水準高位期のものだろう。二枚貝とウニの穴は、上位のノッチの天井に位置しているため、これらの穴の形成は、上位のノッチより新しいが、完新世以前と推定される。これらのケースでは、最小の時代は、ノッチの内側の構造物(海水準と関連する必要がない)の年代測定によって得ることができ、20kaの石筍の年代によるとKPNの東側の上位のノッチは、明確に完新世以前と予想される。

生物の構築物の示標(カキとサンゴ)と堆積学的な海水準示標(浜堤と湿地)は同位体測定(放射性)とルミネッセンス年代測定で年代が分かる。現地性の生物や地形的構造の場合、その年代測定の結果は、この示標のポイントによって指示された海水準の年代を反映している。もし生物が死後運搬されていたら(上位のノッチの腹足類やKPNの割れ目を埋めるカキ)、これらはその時の海水準の最も古い時代を提供する。このことから、生物浸食の示標は海水準変化曲線を復元するには使うことができない。しかし、生物浸食は更新世の中より新しい期間に、現在よりも6m高い海水準の存在を証明した。Phra Thongの東部から得た浜堤の頂部のデータに基づいて、完新世以前の最後の海水準最高位は、約12.5万年前のものによるもので、世界広域で現在より4-6m高い海水準の時代である(例えば、Church et al., 2008; Rohling et al., 2008)。対応するOSLデータは正確な時間を明らかにするには

不正確で(それらの誤差内での年代は 94-140ka), 現在の浜堤の海拔を海水準の示標にするには, 正確な海拔(海水準示標と比較して)を求めるには足りない, これらの浜堤は最終間氷期に関連し, 海水準は氷期のはざままで現在の位置よりも数 m 下にあった. これに対して, 浜堤や湿地と同じように, 現地性のカキやサンゴのすべてのデータを完新世の海水準変動曲線に結合することは可能である(完新世の海水準変動曲線の章).

完新世の海水準変動曲線

私たちの試験的な海水準変動曲線は, 私たちの発見したサンプルの年代のみをカバーする. Leam Son 海岸の断面からのデータや, Phang-nga 湾のカキから得たデータは, 同じ傾向を示し, 最大の海水準高度は現在の相対的海水準の上 3m 以内で(Figure 6a), +2.5~3.0m の最大値は, 5700 年前である. 海水準高位期の年代と規模は GIA モデルの予測と見事に一致する(Horton et al., 2005). Phra Thong 島の浜堤と湿地帯の堆積物による 5300 年前の海水準の復元から, 私たちは, 試験的に 5300 年前の海水準を現在の相対的海水準より上 1.5~2.5m に減じた(Figure 6b). 最も高い浜堤の頂上が現在の相対的海水準より上 5m を超えることはなく, 本来の湿地の底との標高の違いが 1m であることは研究地域の北西部で僅かにより低い海水準を指示する. この違いを説明しうる 3つの説明がある.

(1)完新世後半に, 1m 程度の地殻変動の地域的効果の可能性である. 完新世の間, 地殻変動が全くなかった(Tjia, 1996)というのはあまりにも単純だが(Fenton and Sutiwanich, 2005), 歴史地震や歴史以前の地震活動の膨大なデータ(Department of Mineral Resources)は, 完新世の構造運動の規模, タイミング, そして空間分布に関する定量的情報を与えない. 近年の GPS 測定は, 完新世のテクトニック活動の想定を支持し, 長期間のゆっくりした隆起と, 短期間(数十年間)のスダ断層沈み込み帯での強い地震による加速した沈降のサイクルを示す(Meltzner et al., 2006; Trisirisatayawong et al., 2011). しかし, 隆起と沈降が繰り返し起こるため, それぞれの効果は相殺されるので, 完新世の海水準曲線への絶対的な影響を量的に表すことはとても難しい. さらに, プークットと Phra Thong

の海水準変化の違いを説明できる有意な空間変動に関する手掛かりはない。

(2)二つ目の可能性は、浜堤と湿地堆積物シーケンスの圧密作用である。しかし淘汰の良い細粒～中粒砂で構成されているので、これはありそうもない理由で、他の地域での類似の観察によってもサポートされない。

(3)三番目として、最も合理的な説明はハイドロ-アイソスタシーの効果の地理的な違いである(Horoton et al., 2005)。

私たちの示標の高度に基づき(数に限りがあるが、しかし露出した場所から遮閉された場所まで様々であり、また様々な示標を使っている)、私たちは、現在の春の大潮の潮位の範囲(約 2.5m)のオーダーよりもわずかに高い海水準と潮位が完新世に存在したと結論付けた。

古津波堆積物の解釈のための含蓄

堆積物の形のみで保存されている古津波の場合、浸水域を示す内陸への堆積物の分布、遡上あるいは津波高を示す相対的海水準からの堆積物の高さは、イベントの規模の推定に用いられる。完新世の海水準変動曲線のセクションで述べた海水準変動を考慮すると、タイ西部からの最近 5000 年間の古津波の証拠に関しては、ほとんどの津波時の海水準は現海面より、2.5m よりも上にある。これは、最近数千年間では、古津波の上陸は、それが干潮時に起こったとしても、現在の満潮時の高海水準(春の大潮の範囲の 2.5m は変わらないものとする)にほぼ匹敵する状況であることを暗示するかもしれない。例えば、Ko Phra Thong と Ban Bang Sak に分布する古津波堆積物には、暦年で 500-700 年前のイベントと暦年で 2500 年前以降に起きた 2-3 回の津波(500-700 年前のイベント以外)によるものがある。現在の海水準を基準にすると、これらのイベントの波は 5m(干潮時の海水準より上)までの浜堤を乗り越え、そして内陸 1300m まで浸水することとなる。500-2500 年前の相対的海水準が現在よりも 1-1.5m 高いことを考慮すると、浜堤を乗り越える潜在能力を持つ波高の最小値は、現在の相対的海水準における波高の最小値よりもわずかに小さくてもよい。しかし、1.5m の相違は、1.5-2.0m の潮位差(ほぼ 1 日の干潮と満潮の違い)によって完全に相殺され

る.

現在の相対的海水準よりも低い海水準(そしてそれゆえ津波堆積物の広がりにも、より影響を与える)は、暦年代で7000年前以前の前期完新世で特徴的であり、同期間にはタイでは津波の証拠はない。その代わりに、この7000年間では、海岸線の前進が海水準の動きよりも津波堆積物の分布にはるかに影響する。だが、ある期間の相対的海水準、古地理、古津波堆積物のデータを組み合わせることでは、イベントの規模の根拠のある解釈を与えることはできない。

結論

タイ南部の西海岸に関しては、氷河性アイソスタシーの調整モデルは局地的な高さの差があるものの、中期完新世の海水準高位期を予測する。岩石海岸の固着した生物示標と堆積性海岸の浜堤と湿地の野外の証拠は、この中期完新世の海水準の最も高い時代と高さを定量化するために使われた：(1)海水準は5700年前に最も高くなり、その高さは2.5-3.0mである。その後、海水準は徐々に低下し、現在の海水準に達した。この期間の海水準変動には一時的上昇は観察されない。(2)北部のPhra Thong島と南部のPhang-nga湾の地域差は、おそらくハイドロアイソスタシーの結果であり、完新世の海水準最高位期で1mオーダーの差がある。

これらの海水準変動は津波堆積物の解釈に影響を与え、ひいては津波堆積物をもたらした津波の規模の解釈にも影響を与える。しかしながら、タイの古津波堆積物のために念入りに作られた最近5000年間の相対的海水準は、現在の海面から2.5m高く、干潮と満潮の潮位差に匹敵する。それゆえ、津波による堆積作用へのその影響は、潮位の日変動から区別するにはあまりに小さい。(北村晃寿・川手繁人)