

オーストラリア・クイーンズランド北部海岸の浜堤地形に基づく巨大サイクロン発生履歴研究の検証

田村 亨（産業技術総合研究所）

1. はじめに

本研究の目的は、オーストラリア・クイーンズランド州北部海岸の、浜堤の形成過程を解明し、当地域で行われている浜堤に基づく巨大サイクロン発生履歴復元の妥当性の検証を行うことである。外洋に面する海岸には、砂や礫の海浜が発達する。海浜に河川などから新たに土砂が運搬されて堆積すると、新しい海浜が海側に形成され、元の海浜周辺の砂丘などの高まりは陸側に取り残される。この高まりを浜堤（beach ridge）と呼び、海岸線とほぼ平行方向に細長く発達する。こうして浜堤を発達させながら発達してきた海岸平野を浜堤平野と呼ぶ。浜堤平野は、海面が急激な上昇から安定、もしくは緩やかな下降に転じた6000～7000年前から拡大してきた（e.g., Murray-Wallace et al., 2002）。通常、1つの浜堤平野には、数十列程度の浜堤が保存されている。浜堤平野はごく一般的な地形で、日本の太平洋岸であれば、九十九里平野（森脇, 1979; Tamura et al., 2010）、仙台平野（松本, 1981; Tamura et al., 2008a）、宮崎平野など、日本海側では新潟平野や石狩平野が代表的である。

個々の浜堤はその時々々の海浜での堆積過程と古環境情報を記録している。このため、浜堤の連なりを適切な年代測定とともに解析すれば、過去数千年間にわたる海岸の古環境復元を行うことができる（Tamura, 2012）。しかし、浜堤の形成過程には多様性があることが知られており、個々の海岸で形成過程を理解することが、正確な古環境復元には必要である。この形成過程の多様性は、おおまかには浜堤を構成する粒度により、浜堤の高まりを作る過程の違いから理解することができる。細粒砂が豊富な砂浜では、粒子が陸向きの風で運搬され、それが海浜のすぐ陸側に生えている草や樹木にひっかかることで砂丘を形成する。この砂丘は、前置砂丘（foredune）と呼ばれ、海浜の陸側限界に沿って細長く形成される。海岸線が前進するとともに前置砂丘は取り残され、その高まりは浜堤となる。一方、砂の少ない礫浜では、礫は粒径が大きいため風では運搬されにくい。そこで重要になるのが暴浪時の高波による礫の積み上げで

ある。砂浜であれば、暴浪は引波時に海浜の砂を沖へと引き戻し、海岸侵食を引き起こしてしまうためリッジは形成されない。しかし、礫浜の場合、礫の間隙に水が浸透してしまうために引き波には堆積物を移動させる力がない。こうして高波により、静穏時の波が届く範囲よりも礫が積み上がったものが浜堤となって残される。このように、浜堤には、風成作用による細粒砂の浜堤、および暴浪による礫の浜堤の、2つのエンドメンバーがこれまでの所知られている。ただし、この間の領域である粗粒砂の浜堤の形成過程に関しては、理解が確立されていない。

クイーンズランド州北部海岸地域では、粗粒砂の浜堤平野が数多く発達する (Nott et al., 2009; Forsyth et al., 2010; Nott, 2012; Nott, 2015) 。 Nott et al. (2009) は、本地域の風は通常は非常に弱く、こうした粗粒砂を運搬するに不十分である一方、強い風が吹くサイクロンの発生時は、砂の供給源である海浜が水没してしまうために、粗粒砂の浜堤がサイクロンに伴う浸水によって形成されると結論づけた。さらに、数値計算に基づいてこの粗粒砂の浜堤がCategory 4~5の巨大サイクロンの直撃による暴浪でしか形成され得ないと結論づけ、さらに巨大サイクロンが近年の観測よりも過去にはずっと頻繁に発生していたと結論づけた。これは、気候変動により巨大サイクロンの発生頻度が変化する可能性と、過去数十年間の観測のみに基づいては当地域の海岸の防災対策が十分ではない可能性とを示唆している。一方で、Tamura (2012)は浜堤に基づく古環境解析のレビューを行う中で、Nott et al. (2009)の研究が浜堤の成因について非常に弱い仮定に頼っていることを指摘した。中でも、Nott et al. (2009)では、粗粒砂の運搬限界風速を250 km/h (70 m/s) とした。しかし、粗粒砂の運搬にそれほど強い風は必要なく、特に中粒砂との混合時には110 km/h (30 m/s) 程度の風で運搬されうることを指摘し、Category 1~2程度の通常のサイクロンの風でも浜堤が形成されうる可能性を示した。Nott (2014)はこれに反論し、Category 1~2程度のサイクロンでも海浜が全て水没してしまい、風による砂の運搬は不可能とした。Tamura (2014)は、Nott (2014)による水没の範囲よりも上位に砂の供給源の可能性を示し、風による運搬を完全に否定することは不可能との見解を示した。こうした議論が展開されたものの、そもそも現地のデータが不足しており、充実したものにはならなかった。議論の焦点が風による砂の運搬であったのは、仮に浜堤の最上部が風成層であれば、浜堤の高さに基づいて過去の浸水高を復元することができないためである。また、クイーンズランドの粗粒砂の浜堤の形成過程自体、不明な点が多い。Nott et al. (2009)では、粗粒砂が風では運搬され得ないという、消去法によりサイクロンの浸水を結論づけた。しかしながら、砂浜では暴浪時には一般的に引き波による侵食が起こり (Komar, 1998) , 一般的には浜堤が形成される条件にはならない。

クイーンズランドの粗粒砂の浜堤の形成過程を解明することは、当地域のサイクロン履歴復元の妥当性を検証するのみならず、浜堤の形成過程の多様性を理解する上でも重要である。そこで本研究では、クイーンズランド州北部の浜

堤平野の1つであるCowley Beachを対象に、地中レーダ探査による浜堤地形の内部堆積構造と、光ルミネッセンスによる高分解能年代測定、粒度分析を組み合わせた統合地質探査を行った。

2. 研究の内容と参加者

本研究は、事前打ち合わせ、現地調査、試料・データの分析・解析、の順に行った。

調査地は、クイーンズランドの粗粒砂の浜堤の研究が最初に始められた場所 (Nott et al., 2009) として、Cowley Beach を選択した。現地の協力者として、オーストラリア Wollongong 大学の Colin Woodroffe 教授から、Geoscience Australia の Nicholas William 博士を紹介された。William 氏は 2011 年のトロピカルサイクロン (TC) Yasi の後に現地を訪れ、海岸地形・堆積物の調査経験がある。他にも Wollongong 大学の Thom Oliver 氏、Geoscience Australia の Brendan Brooke 博士の現地調査への協力を得た。現地調査では Cowley Beach の軍事演習施設の敷地内に立ち入る必要があったため、調査許可の手続きは William 氏が事前に行った。

現地調査は、2015 年 2 月 18~23 日と、5 月 16~21 日の 2 回に分けて行った。2 月の調査では、地中レーダ探査、地形測量、ピット掘削およびハンドオーガボーリング、粒度分析と光ルミネッセンス (OSL) 年代測定試料の採取を行い、田村、William, Oliver, Brooke の 4 名が参加した。5 月は 2 月の調査の補足調査として、主にピット掘削により光ルミネッセンス年代測定試料の採取を行った。田村のみ参加した。

現地調査で得た試料とデータは産業技術総合研究所に持ち帰り、田村が分析・解析を行い、結果をとりまとめた。

3. 調査地域

本研究で調査を行った Cowley Beach は、クイーンズランド州北東部、ケアンズの南南東 90 km の海岸に位置している (図 1A)。Cowley Beach の海岸線は、東南東向きでやや湾曲し、全長 15 km である。Cowley Beach の海岸から内陸に、浜堤が発達した海岸平野が発達している。平野の幅は基盤岩に接する北東端で最も大きく 3 km で、そこから南に幅が狭くなり、南西端は河川で区切られる。平野の中央部よりやや南よりで河川が流入し、平野を南部と北部に分けている。浜堤平野の内陸は河川平野で、現在は牧草地や畑地に利用されている。浜堤の高さは平野の内陸部で高く 5~6 m (AHD, Australian Height Datum) におよび、海側部では若干低く 4~5 m である。平野全体が砂質で、浜堤

間の凹地にも泥はほとんど見られない。凹地の標高は3~4 m程度である。現在の海浜は Low-tide terrace タイプ (Masselink and Short, 1993) で、1/10 程度の急勾配な上部、数十分の1程度の緩勾配の下部からなる。Cowley Beach 北東端に位置する Mourilyan Harbour では、平均潮位 0 m (AHD) に対し、最高潮位+1.8 m、最低潮位-1.7 m である (The State of Queensland, 2014)。波浪は、クイーンズランド東岸の沖に発達するグレートバリアリーフのために沖からのうねりがなく、通常時はエネルギーが小さい。静穏時では波高は 1 m 以下で、波の周期は 5~6 秒程度である。風は、サイクロンや熱帯低気圧の発生時を除いて弱く、大半は貿易風による南東風が支配的である。風速は 10~30 km/h が 9 割以上を占め、30~40 km/h が数%である (Nott, 2014)。

2011 年 2 月に発生した TC Yasi は、クイーンズランドにおける観測史上最大規模のサイクロンであった。2 月 3 日の未明に、Cowley Beach の南 20 km の Mission beach において上陸した時の平均風速は 185 km/h、瞬間最大風速は 285 km/h と推測される (The State of Queensland, 2012)。Cowley Beach の南南西 65 km の Cardwell では、2 月 3 日午前 1 時 20 分ごろ、ストームサージにより、予測潮位を 5.33 m 上回る海面が記録された。これは観測史上でも 3 番目の規模である。波浪計が設置された Townsville と Cairns では、それぞれ 4.73 m、2.37 m の有義波高が観測されたが、Townsville ではサイクロンの上陸前後に波浪計にトラブルがあったため最大の波は記録されなかったことが推測される。TC Yasi により、各沿岸域で浸水が観測された。Cardwell は、+6.5 m (AHD)、Mission Beach で+3.5 m で、各地で概ね最高潮位より 1~2.5 m 高い浸水が見られた。ただし、TC Yasi の上陸時は干潮に重なっており、仮に満潮時であればこれよりも 3 m 程度高い浸水となりえたことが予測される。

調査は、北部 Cowley Beach の中の南部において行った (図 1B)。CB-1、-4、-6 の海岸と直交方向の 3 測線において現海岸近くの調査を行い、また CB-6 の陸側延長、および若干の距離を置いた CB-7 において内陸部の浜堤の地中レーダ探査とピット掘削、オーガー掘削を行った。CB-13 においては、トレンチ掘削を行った。浜堤平野全体で樹木の密度が高く、内陸部の調査は樹木が切られている通路沿いに行ったが、地形面の高さは側方の樹木が生えている部分とほぼ同じで、大きく変更された形跡はない。

4. 研究手法

現海浜、地中レーダ探査測線ともに、地表面の測量はオートレベルを用いて行った。標高は、測線 CB-6 の陸側端付近のベンチマーク PM29637 を用いた。

地中レーダ探査は、CB-7 (測線長 470 m)、CB-6 の (同 190 m) について行った。装

置は PulseEkko Pro システム（カナダ Sensors & Software 社）に周波数 250 MHz の遮蔽アンテナを用いた。アンテナの間隔は、約 37 cm である。図 2A に示すように、アンテナをそりに搭載し、またそりには移動のためのハンドル、移動距離を計測するためのホイールを取り付けた。レーダのパルス電波は測線を 5 cm 進むごとに発射し、その反射波を受信することで探査を行った。得られた地中レーダのデータは、Reflexw（ドイツ Sandmeier Scientific Software 社）により解析した。データ解析では、デワウ、ゼロタイム補正、バンドパスフィルター処理、時間-深度補正、および地形補正を行った。時間-深度補正では電波速度が必要なため、Common Mid Point 法により測線上のいくつかの点で見積もった所、地下水面上では 0.13 m/ns, 0.07 m/ns となり、それぞれ不飽和湿潤砂、飽和湿潤砂の速度として一般的な値であった。さらに CB-7 の 189 m 地点でのオーガー掘削による地下水深度と比較した所、地下水面上の電波速度の算出値は妥当であることが明らかとなった。地下水面上、下のそれぞれの速度を考慮すると、電波の波長はそれぞれ約 50 cm, 30 cm である。電波長の 1/2~1/4 に相当する分解能は、近い水面上、下においてそれぞれ 10~20 cm, および 10 cm 程度である。

堆積物試料の採取は、OSL 年代測定、粒度分析のために、表層、ピット、オーガー孔で行った。現海浜においては、約 5 cm 四方、深さ 5 cm までの表層からバルクの堆積物を採取した。測線 CB-6 および CB-7 上の複数地点で掘削したピット（図 2C）は、最大深さ 100 cm である。壁面は整形して観察・写真撮影を行い、表層より底部まで 5 cm 間隔で厚さ 1 cm 程度の粒度分析用試料を採取した。さらに、壁面からは長さ 15 cm, 直径 5 cm の塩ビ管を打ち込むことで、OSL 年代測定用の試料を採取した。何点かのピットでは、底面をさらにハンドオーガーで掘削することで深部の試料を採取した。オーガーは、Sand Auger（オーストラリア Dormer Engineering 社）を用いた。オーガー掘削時に先端から粒度分析試料を採取した（図 2B）。OSL 年代用の試料を採取する際には、オーガー先端をステンレスパイプに交換し、それを打ち込むことで遮光試料を得た。

粒度分析は、採取した試料から 62 μm の篩で泥分を除去し、有機物と貝殻片をそれぞれ過酸化水素と塩酸により、また軽石をハンドピックにより除去した上で行った。粒径の測定は、Camsizer（ドイツ Retsch 社）を用いて行い、結果はそれぞれの試料の粒度分布の 90 パーセントイル粒径、中央粒径、10 パーセントイル粒径を phi スケールで表した。

OSL 年代測定用試料の処理は、ルミネッセンス信号に影響がない暗室内の赤色光のもとで行った。採取した塩ビ管の端から 20~25 mm は露光している可能性が高いため取り除き、含水率測定と、ICP-MS による堆積物中の放射性元素の定量に用いた。OSL を測定するための石英粒子は、Bateman and Catt (1996) に従い抽出した。まず炭酸塩と有機

物を除去するために塩酸と過酸化水素を加え、反応が終わると蒸留水で洗浄後に乾燥させ、対象粒径の 180–250 μm の粒子を篩分けにより取り出した。さらにポリタングステン酸ナトリウム溶液で比重 2.7 に調整した重液で重鉱物と軽鉱物に分け、さらに軽鉱物からフッ酸により石英以外の粒子を取り除いた。こうして得た石英粒子は直径 9.8 mm のステンレスディスクに搭載し、TL-DA- 20 Risø TL/OSL Reader (デンマーク DTU) において測定した。この測定装置には、光励起のための波長 $470 \pm 30 \text{ nm}$ の青色 LED と、試料への放射線照射のための $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ベータ線源が装備されている。試料から発せられた OSL は、Hoya U-340 を通してフォトマルで計測した。

OSL 年代は、試料が埋積中に蓄積された放射線量 (蓄積線量) を、試料が単位時間あたりに照射された放射線量 (年間線量) で除すことによって求める。このうち、蓄積線量は、Single-Aliquot Regenerative-dose (SAR) 法 (Murray and Wintle, 2000) に基づき、ルミネッセンスの測定により求めた。OSL の計測温度は 125°C 、励起時間は 20 秒間である。OSL 計測前の加熱 (プレヒート) の温度の最適値は、 160°C から 260°C までのプレヒートテストを行い、 220°C を選択した。またカットヒート温度は 160°C とした。ベータ線照射により 0 Gy を含む 4 点の OSL 再生点から、蓄積線量と OSL 強度との検量線を求め、天然の OSL 強度に対応する蓄積線量 (等価線量) を求めた。4 点の再生点を求めた後、最初の再生点と同じ線量照射と測定を繰り返し、SAR 法による OSL 感度補正が適切に行われているかどうかをディスクごとに確認した。この時、感度補正後の OSL 強度の比をとり、10% 以上の差がある場合、そのディスクの測定値は用いなかった。1 試料につき、24 個のディスクを測定した。ディスクごとに得られた等価線量は、Central Age Model (Galbraith et al., 1999) により平均値を求めて、年代決定に用いた。

年間線量の算出では、堆積物中の放射性元素の濃度と宇宙線強度の両方を考慮した。放射性元素 (U, Th, Rb, K) の濃度は ICP-MS 分析をオーストラリア SGS Minerals Service に依頼し決定し、またその値から Adamiec and Aitken (1998), Marsh et al. (2002) に基づき年間線量を算出した。また、宇宙線強度は Prescott and Hutton (1994) に基づき求めた。

蓄積線量を年間線量で除すことにより求められた年代は、全て 2015 年を基準に表す (単位 : yr, 年前)。

5. 結果と考察

5. 1. 現海浜およびその近傍の地形断面

現海浜の付近の地形断面の測定結果を図 3 に示す。3 つの測線、CB-1, -4, -6 において、断面の形態が非常に似ていることが明らかである。CB-4, -6 では現在のバームク

レストの他、内陸の2つのリッジの断面が得られた。一方のCB-1では2つ目のリッジには植生のためアクセスできなかつただけで、基本的には他の測線と同様の傾向が見られる。バームクレストの標高は、どの測線でも約+2.5 m AHD付近で、そこから海側には勾配 1/10 程度の海浜斜面 (beachface) が発達する。海浜の斜面勾配は標高 0 m AHD 以下で明瞭に緩くなるが、観察時は海面下であったために測量できなかった。バームクレストから陸側の 5~10 m の区間には、陸側に緩やかに傾斜するバームが発達し、これより陸側において草本、木本の植生がある。バームから海側では植生がなく、通常時の波の打ち上げがバームの陸側端まで及んでいることが示唆される。バームの陸側端には、植物片や軽石等のデブリが大量に集積し、同様に波の打ち上げが示唆される。バーム陸側端より 30~35 m には、標高+3.2~3.5 m 程度のリッジが見られ、その海側斜面はやや急勾配で、侵食された特徴 (スカープ, scarp) が認められる。さらに陸側の幅 40 m 程度の区間においては標高+3.5 m より若干高いリッジが発達する。現在の海浜に近い1番目のリッジは、2番目のリッジや下記の内陸のリッジに対して、標高がやや低いことと植生の密度が小さいことから、完全に現在の海岸のプロセスから放棄された地形とは見られないため、ここでは準浜堤と呼び、その他のリッジについては浜堤と呼ぶ。

5. 2. 現海浜およびその近傍の粒度特性

現海浜の表層堆積物に対する粒度分析結果を図 4 に示す。表層堆積物は、海浜と準浜堤が分布する、バームクレストを起点に内陸 35~50 m および海側に 20~35 m の範囲から採取した。CB-1, -4, -6 ともに同様の粒度傾向を示す。準浜堤海側斜面に見られるスカープを境に海側では明瞭に粗粒化して、側方変化が大きいものに対して、陸側での変化は大きくない。指標粒径ごとの傾向も3測線で共通している。中央粒径は、スカープよりも陸側では3測線とも 1~1.5 phi (中粒砂) の値をとるのに対し、海側ではCB-1においては-2~1.5 phi (細礫~中粒砂)、CB-4, CB-6においては-0.5~1.5 phi (極粗粒~中粒砂) である。10パーセントイル粒径は、スカープよりも陸側で3測線とも 0~1 phi (極粗粒砂) であるのに対し、海側では、-3~1 phi (細礫~極粗粒砂) となる。90パーセントイル粒径は、スカープよりも陸側では約 2 phi (細粒~中粒砂) である一方で、海側では、CB-1においては-0.5~2 phi (極粗粒~中粒砂)、CB-4では 1~2 phi (中粒砂)、CB-6では 1.5~2.5 phi (中粒~細粒砂) である。以上をまとめると、全体に粗粒な印象がある Cowley Beach の海浜であるが、表層堆積物については、スカープよりも陸側では半分以上が中粒~細粒砂であり、極粗粒砂より粗粒なものはほとんどないか、10%に満たない。一方で通常の波浪の影響が示唆されるスカープよりも海側では、細礫までの粗粒な粒子が分布している。

現海浜の表層堆積物の粒度分析結果を、採取標高ごとに表示したのが図 5 である。どの指標粒径も、標高+2.5 m AHD を境に、それより下位では粗粒で変化が大きく、上位では細粒でほぼ一定である。バームクレストの標高が約+2.5 m AHD であり、そこからスカープまではやや陸側に傾斜する現在の海浜地形断面を考えると、通常の波浪が影響する範囲とそれ以外において粒度特性が大きく異なっていることが示される。

5. 3. 現海浜の堆積構造

図 6 には、地点 CB-13 で行った現海浜のバーム陸側部から準浜堤海側のスカープまでのトレンチの写真と、そのスケッチを示す。CB-1, -4, -6 の海浜断面（図 3）にも見られるように、準浜堤の海側斜面には、一貫してスカープが発達する。トレンチの掘削場所として地点 CB-13 を選択したのは、この地点でスカープがよりはっきりと保存されているためである。トレンチの長さは約 3 m で、深さは最大 70 cm である。スカープから連続して、重鉱物の濃集する平行葉理で特徴付けられる侵食面が現在のバーム下に発達し、その勾配は 1/6 程度である（図 6B）。スカープの直下、およびスカープから 2.6 m 海側の地点の侵食面の上位と下位の 2 点、合計 3 箇所の OSL 年代は、侵食面上位で 8 ± 1 yr, 下位では 30 ± 2 yr, 37 ± 2 yr となった。これらの年代は若すぎるためにルミネッセンス年代の確度は低いが、侵食面をはさみ、ある程度の時間差があることが明らかである。Nott et al. (2013) で示された TC Yasi の直後の Cowley Beach の地形断面では、バームクレストが発達せず、準浜堤のすぐ海側に海浜斜面が認められる。Yasi による侵食により、スカープと、このトレンチで認識される侵食面が形成されたと考えられる。

5. 4. 浜堤の地形・地中レーダ断面

図 7, 図 8 には、それぞれ測線 CB-6, -7 の地中レーダ断面を示す。CB-6 陸側端と CB-7 の海側端との間の距離は 30 m あるが、沿岸方向のオフセットは数 m のため、続けて 1 つの海-陸方向測線とみなす。合計で 700 m 弱の区間において、10 列以上の浜堤が認められる。最もクレストの標高が高い浜堤は、189 m 地点のもので、+5.1 m AHD である。これよりも内陸の 20 m 地点、および 50~60 m 地点の浜堤も比較的高く、+4.0~4.2 m 程度である。その他の浜堤の標高は+4.0 m を超えない程度であり、上述の通り、現海浜近くの準浜堤は+3.5 m よりも低く、その隣の浜堤も+3.5 m 程度で、内陸側の浜堤に比べると低い。

地中レーダ探査では、250 MHz のアンテナを用いたケースとしては極めて透過が良好で、最大深度 8 m までの非常に明瞭な反射断面が得られた（図 7・8）。地中レーダ断面内には地下水面が認められ、その上位と下位で反射面は異なる特徴を示すため、上位

を上部ユニット，下位を下部ユニットと定義する．地下水面は比較的強く連続的な反射面で，CB-7の陸側端での+2 m AHD から，現海浜付近の+1 m AHD と，非常に緩やかに海側に傾斜する．上部ユニットにおいては，水平または陸側・海側双方に緩やかに傾斜する反射面が多く，所により海側に傾斜する侵食面に切られる．また，特に浜堤の下において，水平または上に凸のハンモック状の反射面の連なりにより，ドーム状の構造が認められる．このドーム状構造の上面の標高 (+2.5 m) や形態は，現在のバームクレストと似ているため，バームクレストが埋積されたものであると解釈される．下部ユニットは，明瞭に海側に傾斜する反射面の連なりが特徴的で，他の多くの浜堤～海浜堆積物の地中レーダ断面 (Jol et al., 1996; Bristow and Pucillo, 2006; Rodriguez and Meyer, 2006; Tamura et al., 2008b, 2010) と同様に，海浜斜面での堆積による海側への前進を示している．あまり明瞭ではないが，海側に傾斜する反射面は，標高 0～-1 m 付近で勾配が緩くなり，それより深部で再び急になり，また緩くなるという，シグモイダルな形態を示す．現在の海浜斜面は，標高 0 m 以下で勾配の緩い low-tide terrace を示す (図 3)．より沖の外浜の海底勾配については明らかではないが，おそらく low-tide terrace の沖で再び勾配が急になり，地中レーダ断面に見られるようなシグモイダルな海底地形面を形成していると予測される．上部ユニットの侵食面の中には，地下水面を超えて下部ユニットまで連続して認識できるものもある．

OSL 年代は，調査を行った浜堤が，過去 2700 年間に陸側から海側へ順に形成されたものであることを示している．測線 CB-7 では，20 m 地点，189 m 地点，また 450 m 地点において，若干の年代値の逆転が見られるが，概ね，地中レーダ断面による層序と整合的な年代が得られた．測線 CB-6 においては，個々の年代値の誤差を考えると全く矛盾のない結果が得られた．500～550 m 地点の浜堤が 430～510 年前に形成される間に，その海側の 570 m 地点は海浜であったことが示される．地点 570 m に海浜があった時期からしばらくのギャップをおいて，610 m 付近の浜堤は 260 年前頃に形成が始まるが，640 m 地点の最下位の年代値，もしくは 630 m 地点の年代値に示されるように，180～210 年前まで形成が続く．最も海側の準浜堤の大半は過去 100 年間に形成されている．準浜堤の海側のスカープは，CB-13 に見られるもの (図 6) と連続で，現在のバームは 2011 年の TC Yasi の発生以降に形成された．

5. 5. 浜堤の粒度特性

浜堤において掘削したピットとハンドオーガーから採取した試料の粒度分析結果を図 9 に示す．クレストの標高が+4 m AHD を超える浜堤は，20 m，50～60 m，189 m 地点の 3 つだけだが，+4 m よりも上位では下位に比べて明瞭に細粒で，鉛直変化が小さ

い. 中央粒径 (図 9B) は, +4 m 以上で 1.0~1.3 phi (中粒砂), +4 m 以下では鉛直変化を示し, -0.4~1.0 phi (極粗粒~中粒砂) である. 現在のバームクレストである CB-6 の 170 m 地点のみ, +2 m 付近に粗粒な層が認められ, -1.5~-1.0 phi (細礫~極粗粒砂) である. 90 パーセントイル粒径 (図 9A) は, +4 m 以上で 1.7~2.2 phi (中粒~細粒砂) で, +4 m 以下では 0.5~2.3 phi (粗粒~細粒砂), 中央粒径と同様に CB-6 の 170 m 地点のみ, +2 m 付近で相対的に粗粒で, -1.0~0 phi (極粗粒砂) となる. 10 パーセントイル粒径 (図 9C) は, +4 m 以上で 0~0.5 phi (粗粒砂), +4 m 以下では -2.5~0.5 phi (細礫~粗粒砂) である. 現海浜付近の表層堆積物の標高ごとの粒度特性 (図 5) と比較すると, ある標高を境界に上位が細粒で, 中央粒径が 1.0~1.3 phi でほぼ一定となる点で共通しているが, 表層ではその境界の標高が +2.5 m であるのに対し, 浜堤地下では +4.0 m と大きな違いがある. Nott et al. (2013) では, Cowley Beach の準浜堤地下で級化する砂層を報告しているが, 級化層において表層 (上部) のみを採取した場合, 全体よりも細粒なものばかりに偏ってしまう. このことが, 浜堤地下と現海浜付近での粒度の違いの原因になっている可能性がある. 一方, 浜堤の内部に暴浪の打ち上げによる堆積物が存在するとしても, 表層付近が風成堆積物から構成されるとすると, 両者の粒度特性の違いが説明できる. この仮定に基づくと, CB-7 の 189 m 地点における最も高い浜堤の上部 1 m 以上は風成堆積物となる可能性がある. つまり, +4 m 付近までは暴浪の打ち上げにより波浪性の堆積物が形成されるものの, それ以上の浜堤の積み上がりは, 風が大きな役割を果たしていることが示唆される.

5. 6. 浜堤の形成過程・巨大サイクロン示標としての妥当性

以上で得られたデータを総合することにより, Cowley Beach の浜堤の形成過程を推定する. まず, 地中レーダ断面の下部に海浜斜面の層理が見られることから, 海岸線の前進は, 基本的には, 他の海浜と同様に, 静穏時に砂が海浜斜面に付加することで発生していると考えられる. TC Yasi を含め, 暴浪時においては, 海浜斜面上部から現在スカープが形成されている後浜限界で侵食が発生する. これによる侵食面は, 地中レーダ断面上部に認められる. Cowley Beach の最高潮位と最低潮位の差は 3.5 m あり, 最高潮位時 (+1.8 m AHD) には, 静穏時の波であっても, +2.5 m まで波が打ち上がり, バームクレストを形成する. こうして形成されたバームクレストのうち, その後の暴浪による侵食を免れたものは, 浜堤の核になる. この証拠として分かりやすいのは, 650 m 地点付近のドーム状の構造である. 現在の準浜堤から浜堤への移行から推測すると, バームクレストの上に, 暴浪が覆うことで +4.0 m までは粗粒砂より細粒な砂が堆積し, 浜堤が成長する. ただし, 現海浜付近の表層堆積物において推測されるように, +4.0 m より下

位でも風成砂が堆積することもある。こうした暴浪と風による堆積により、今回調査を行った浜堤の大半を占める標高+4.0 m 以下の浜堤の形成は説明される。一方、+4.0 m を超えるより古い浜堤の最上部は比較的細粒であり、全体が風成の可能性はある。ただし、風による Cowley Beach の運搬は、Nott et al. (2009)により否定されている。これを検証するためには、現在の環境で比較的風が強い時に風による砂の運搬が発生しているかどうかを観測することが必要である。図 10 は、5 月 16 日に測線 CB-6 海側端付近のバーム上で観察された、粗粒～中粒砂から成る風成リップルである。この日は荒天で、Cardwell で約 30 km/h の平均風速が観測され、また他の場所では 50 km/h 以上の瞬間最大風速が観測された。Cowley Beach に風速計は設置されておらず、実際の風速は不明であるが、少なくとも、サイクロンとは関係のない時期に Cowley Beach において風による砂の運搬が発生していた証拠である。

以上推定される浜堤の形成過程に基づくと、Cowley Beach の浜堤の、過去の巨大サイクロン発生の示標としての妥当性は強く疑われる。現時点で暴浪により形成されたことが明らかなのは、浜堤の中でも+4.0 m AHD 以下の部分である。この規模の浸水は、2006 年の TC Larry, 2011 年の TC Yasi による Mission Beach での浸水が+3.5 m AHD に及んだこと (The State of Queensland, 2012) からも、数年～数十年スケールで頻繁に発生するものと考えられる。現海浜の観察に基づけば、最高潮位時には、静穏時の波浪でも+2.5 m AHD までは到達する。ここにサイクロンの暴浪の打ち寄せ (ランナップ) や、低気圧と陸向きの風による海水面のセットアップの効果が加わることにより、特別に巨大なサイクロンでなくとも、+4.0 m までの浸水は可能であると考えられる。Nott et al. (2009)は、数値シミュレーションにより、Cowley Beach でも比較的高い+5 m AHD に水面が到達するため、カテゴリ4 や 5 のサイクロンが Cowley Beach の直上を通過することが必要であると考えたが、ここで、基準の潮位として平均潮位である 0 m AHD を仮定している。しかし、稀な現象であることを考慮するのであれば、潮位は最高潮位である 1.7 m を仮定すべきであり、これにより必要となるサイクロンの規模は大幅に小さくなるはずである。このように、風による浜堤の形成と潮位変動との 2 点を考慮すると、現状の理解では、Cowley Beach の浜堤は過去の巨大サイクロンの示標として用いることはできない。

引用文献

- Adamic, G., Aitken, M., 1998. Dose-rate conversion factors: update. *Ancient TL* 16, 37–50.
- Bateman, M.D., Catt, J.A., 1996. An absolute chronology for the raised beach deposits at Sewerby, E. Yorkshire, UK. *Journal of Quaternary Science* 11, 389–395.
- Bristow, C.S., Pucillo, K., 2006. Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: the Holocene fill of Guichen Bay, south-east South Australia. *Sedimentology* 53, 769–788.
- Forsyth, A.J., Nott, J., Bateman, M.D., 2010. Beach ridge plain evidence of a variable late-Holocene tropical cyclone climate, North Queensland, Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 297, 707–716.
- Galbraith, R.F., Roberts, R.G., Laslett, G.M., Yoshida, H., Olley, J.M., 1999. Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I, experimental design and statistical models. *Archaeometry* 41, 339–364.
- Jol, H.M., Smith, D.G., Meyers, R.A., 1996. Digital ground penetrating radar (GPR): a new geophysical tool for coastal barrier research (examples from the Atlantic, Gulf and Pacific Coasts, U.S.A.). *Journal of Coastal Research* 12, 960–968.
- Komar, P.D., 1998. *Beach Processes and Sedimentation*, 2nd edition. Prentice Hall, New Jersey, 544 pp.
- Marsh, R.E., Prestwich, W.V., Rink, W.J., Brennan, B.J., 2002. Monte Carlo determinations of the beta dose rate to tooth enamel. *Radiation Measurements* 35, 609–616.
- Masselink, G., Short, A.D., 1993. The effect of the tide range on beach morphodynamics: a conceptual model. *Journal of Coastal Research* 9, 785–800.
- 松本秀明, 1981. 仙台平野の沖積層と後氷期における海岸線の変化. *地理学評論* 54, 72–85.
- 森脇広, 1979. 九十九里浜平野の地形発達史. *第四紀研究* 18, 1–16.
- Murray, A.S., Wintle, A.G., 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32, 57–73.
- Murray-Wallace, C.V., Banerjee, D., Bourman, R.P., Olley, J.M., Brooke, B.P., 2002. Optically stimulated luminescence dating of Holocene relict foredunes, Guichen Bay, South Australia. *Quaternary Science Reviews*, 21, 1077–1086.
- Nott, J., Smithers, S., Walsh, K., Ed Rhodes, E., 2009. Sand beach ridges record 6000 year history of extreme tropical cyclone activity in northeastern Australia. *Quaternary Science Reviews* 28, 1511–1520.

- Nott, J., 2012. Storm tide recurrence intervals—a statistical approach using beach ridge plains in northern Australia. *Geographical Research* 50, 368-376.
- Nott, J., Chague Goff, C., Goff, J., Sloss, C., Riggs, N., 2013. Anatomy of sand beach ridges: evidence from severe Tropical Cyclone Yasi and its predecessors, northeast Queensland, Australia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118, 1710–1719.
- Nott, J., 2014. Grain size and the origin of wave constructed beach ridges. A Discussion of ‘Beach ridges and prograded beach deposits as palaeoenvironment records’. *Earth-Science Reviews* 132, 82-84.
- Nott, J.F., 2015. A rapid, economical, and accurate method to determining the physical risk of storm marine inundations using sedimentary evidence. *Geophysical Research Letters* 42, 2426-2433.
- Prescott, J.R., Hutton, J.T., 1994. Cosmic ray contribution to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements* 23, 497–500.
- Rodriguez, A.B., Meyer, C.T., 2006, Sea-level variation during the Holocene deduced from the morphologic and stratigraphic evolution Morgan Peninsula, Alabama, U.S.A. *J. Sed. Res.* 76, 257–269.
- Tamura, T., 2012. Beach ridges and prograded beach deposits as palaeoenvironment records. *Earth-Science Reviews* 114, 279-297.
- Tamura, T., 2014. Aeolian transport of coarse sand over beach ridges in NE Australia: A reply to a discussion of ‘Beach ridges and prograded beach deposits as palaeoenvironment records’. *Earth-Science Reviews* 132, 85-87.
- Tamura, T., Saito, Y., Masuda, F., 2008a. Variations in depositional architecture of Holocene to modern prograding shorefaces along the Pacific coast of eastern Japan. In: Hampson, G.J., Steel, R.J., Burgess, P., Dalrymple, R.W. (Eds.). *Recent Advances in Models of Siliciclastic Shallow-marine Stratigraphy*. SEPM Special Publication 90, 189–203.
- Tamura, T., Murakami, F., Nanayama, F., Watanabe, K., Saito, Y., 2008b. Ground-penetrating radar profiles of Holocene raised-beach deposits in the Kujukuri strand plain, Pacific coast of eastern Japan. *Marine Geology* 248, 11–27.
- Tamura, T., Murakami, F., Watanabe, K., 2010. Holocene beach deposits for assessing coastal uplift of the northeastern Boso Peninsula, Pacific coast of Japan. *Quaternary Research* 74, 227–234.
- The State of Queensland, 2012. Tropical Cyclone Yasi 2011 – Post Cyclone Coastal Field Investigation. ISBN 978-0-9805641-6-7, 61 p.

The State of Queensland, 2014. Queensland Tide Tables Standard Port Tide Times 2015.

Downloaded from <http://www.msq.qld.gov.au/tides/tide-tables.aspx> on 20 August, 2015.

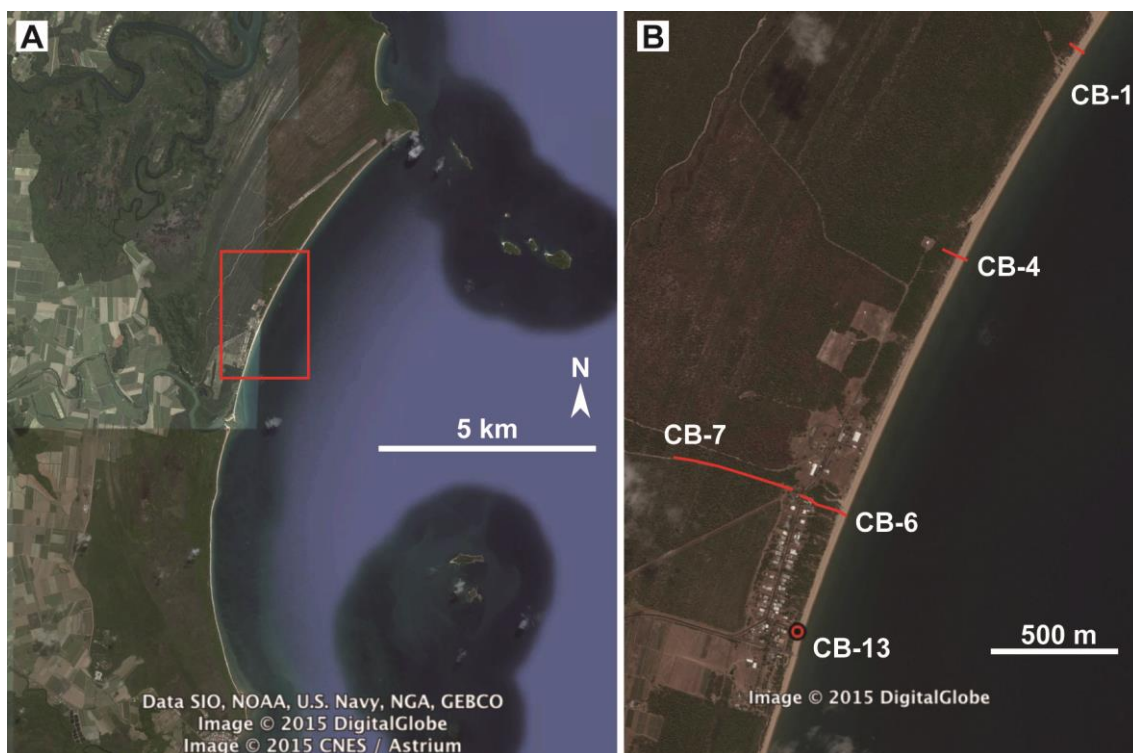


図 1. A) オーストラリア・クイーンズランド州北部カウリービーチの衛星画像. 左上隅の座標： $S17.67^{\circ}$ ， $E146.11^{\circ}$ ．右下隅の座標： $S17.70^{\circ}$ ， $E146.12^{\circ}$ ．B) カウリービーチ海岸付近の衛星写真. 調査測点および地点を示す. 画像の位置は，A 図に示す. 衛星画像は Google Earth より使用.



図 2. 現地調査の風景. A) 地中レーダと地形測量. B) ハンドオーガーからの粒度分析試料の採取. C) 掘削したピットからの粒度分析試料 (5 cm 刻み) の採取と、ルミネッセンス年代測定試料 (黒チューブ) の採取.

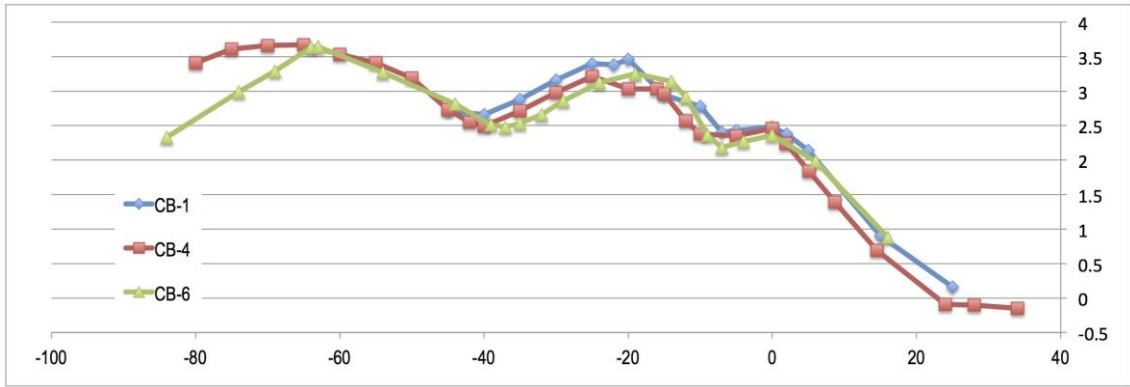


図 3. 測線 CB-1, -4, -6 (図 1B) における海岸と直交方向の地形断面. 各測線とも現在の海浜に発達するバームクレストを 0 m に揃えている. 縦軸は標高 (m AHD, Australian Height Datum), 横軸は距離 (m).

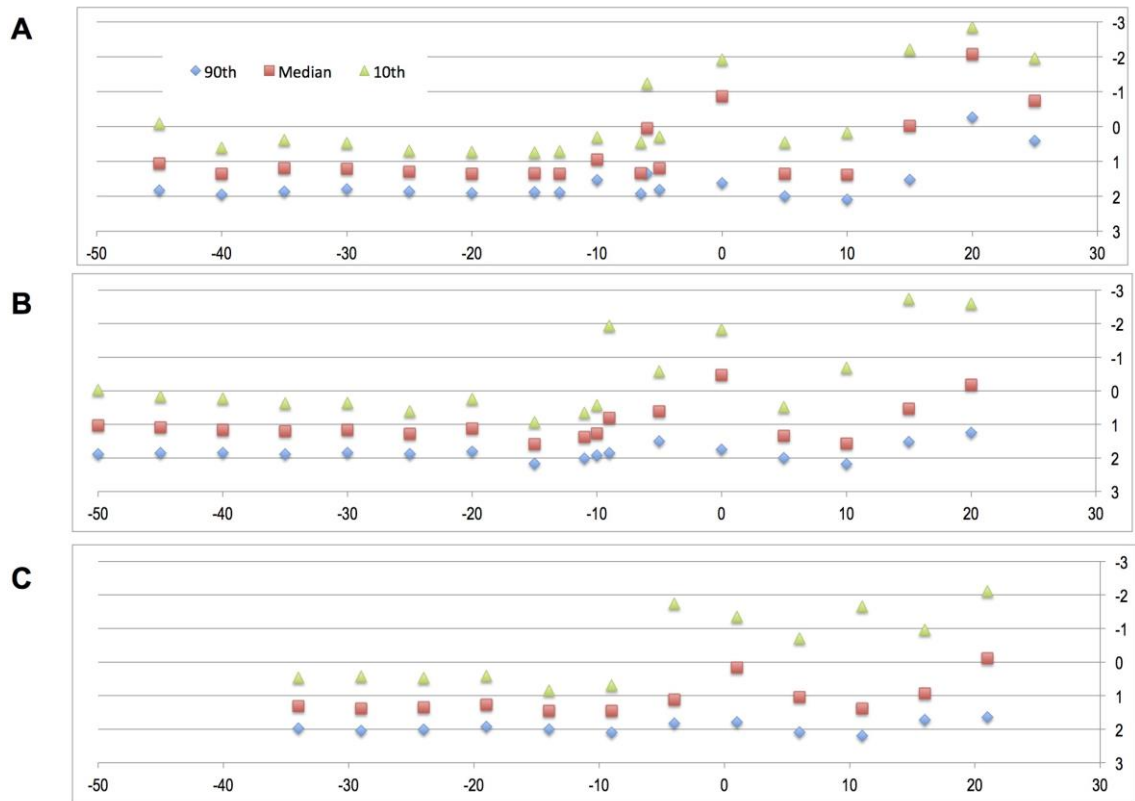


図 4. 現海浜近傍の測線 CB-1 (A), CB-4 (B), CB-6 (C) における表層堆積物の粒度. 各試料の 90 パーセンタイル, 中央値, 10 パーセンタイルを示す. 横軸は図 3 と同様にバームクレストを 0m に揃えている. 縦軸は粒度 (phi スケール).

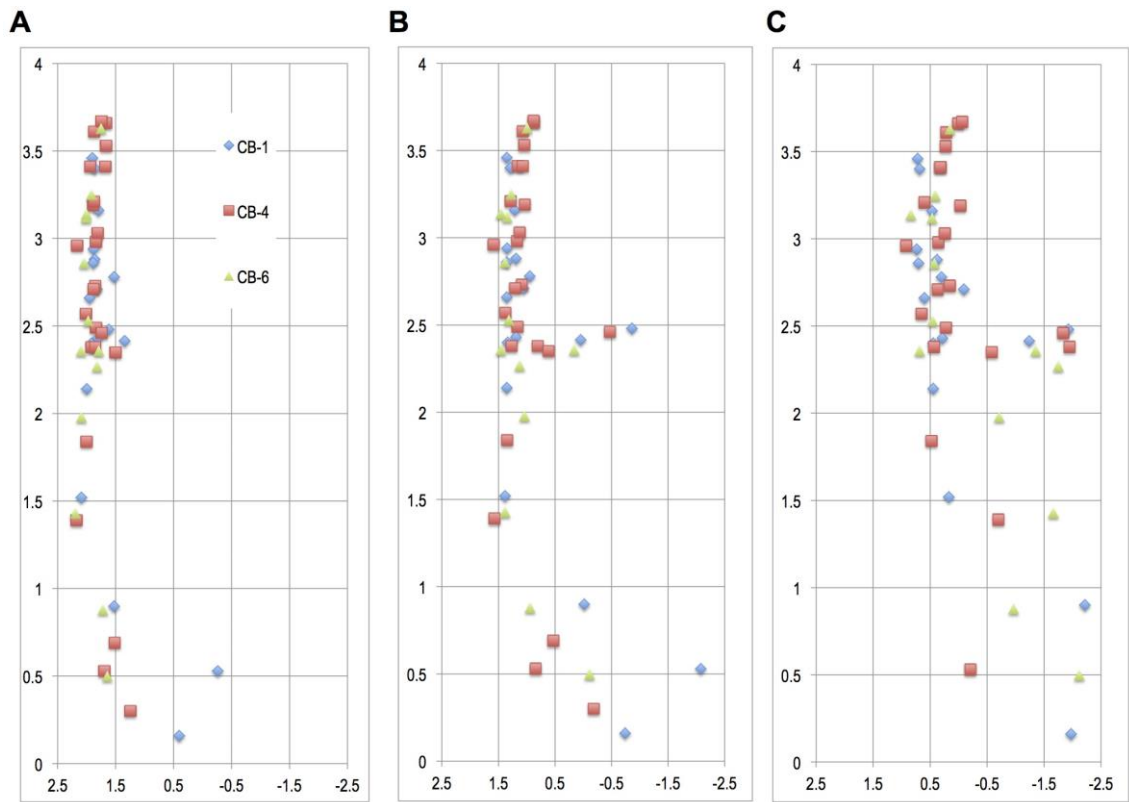


図 5. 現海浜近傍の表層堆積物の標高ごとの粒度特性. A) 90 パーセンタイル, B) 中央粒径, C) 10 パーセンタイル. 横軸は粒度 (ϕ スケール), 縦軸は標高 (m AHD).

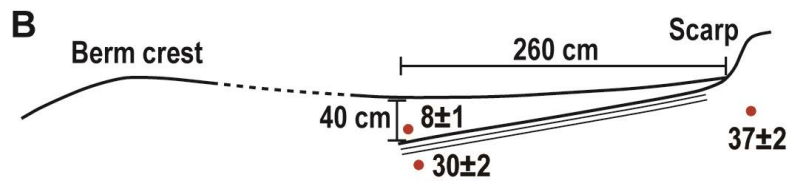


図 6. 地点 CB-13 におけるトレンチ写真 (A) とその模式断面図. 写真右端に見られる, 侵食された砂丘の海側斜面 (スカープ) から海側に重鉍物の濃集面 (侵食面) が連続し, その上位と下位で明瞭な年代差がある. 赤丸は年代測定試料の採取位置, 脇の数字は光ルミネッセンス (OSL) 年代 (年前) を示す.

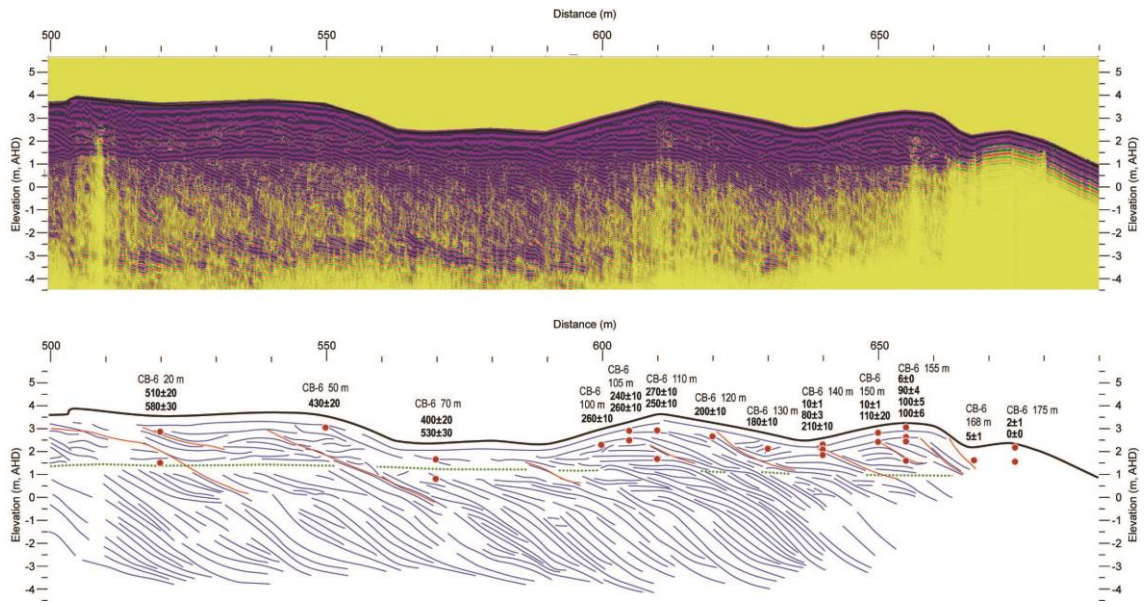


図 7. 測線 CB-6 の地中レーダ断面（上）とその解釈（下）. 反射面のトレースを青線，断面上部に見られる侵食面を赤線，地下水面を緑の破線で示す. 赤丸は年代測定試料の採取位置，脇の数字は OSL 年代（年前）を示す. 各掘削箇所の名前も合わせて示す. 横軸の距離は陸側の CB-7 の始点からの累積. 右端のリッジは現在のバームクレストである.

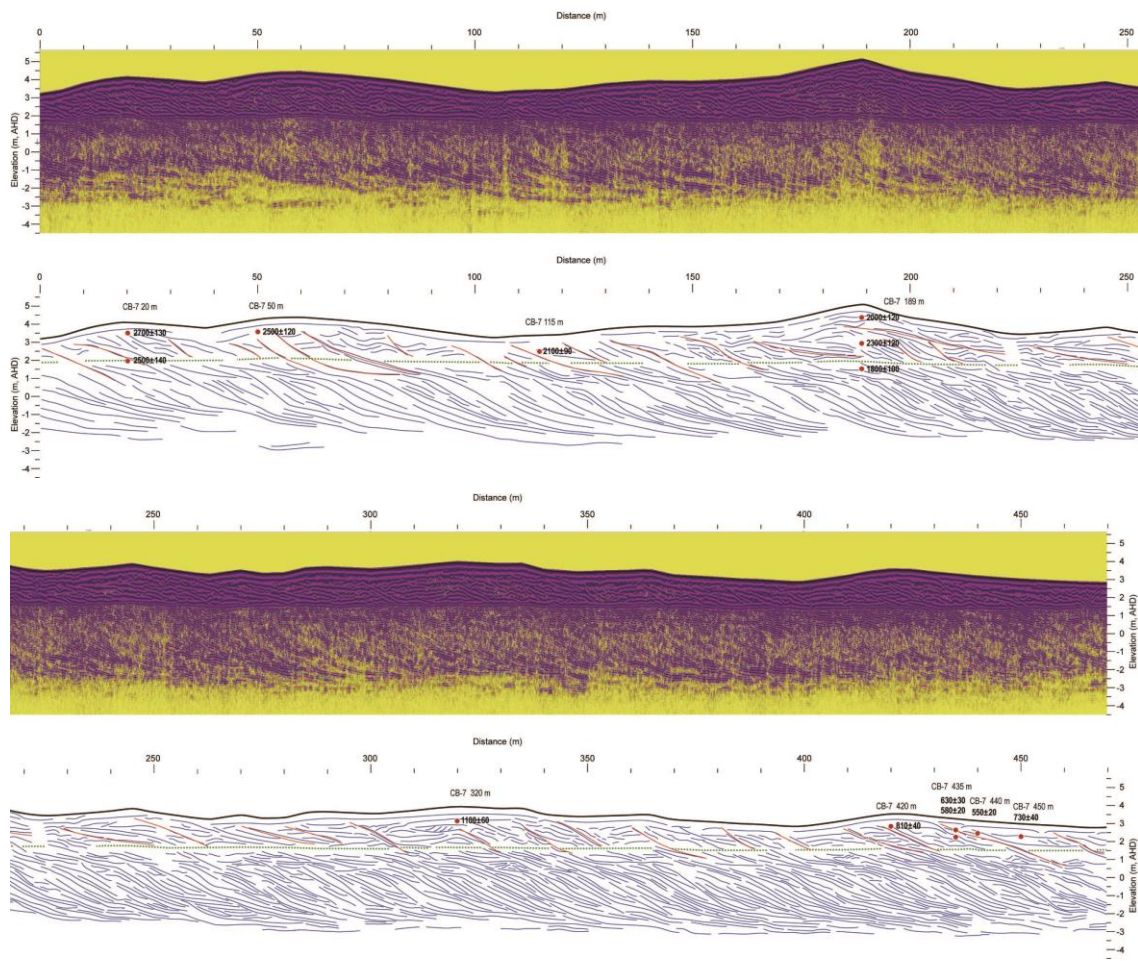


図 8. 測線 CB-7 の地中レーダ断面（上）とその解釈（下）. 断面の見方は図 7 と同様.

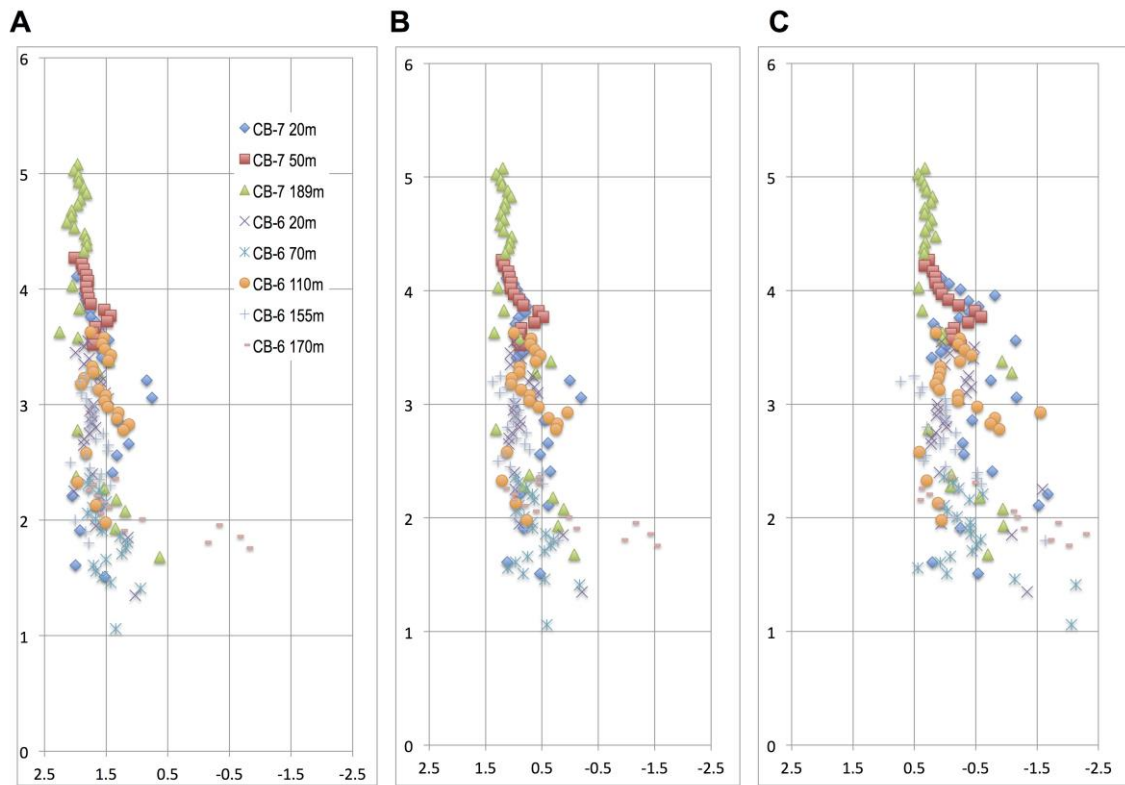


図9. 測線 CB-6, CB-7 上の各掘削点から採取した堆積物試料の粒度特性. A) 90 パーセンタイル, B) 中央粒径, C) 10 パーセンタイル. 横軸は粒度 (ϕ スケール), 縦軸は標高 (m AHD).



図10. 2015年5月16日13:30頃観察された, バーム上の風成リップル. CB-6 海側端付近. 標尺の長さは1m. リップルのクレストの方向は東西方向で, 波長5~10cm, 波高5~10mm, 粒度は中粒~粗粒砂である.