アフリカ・マダガスカル島海岸の 巨大津波痕跡

Traces of a gigantic tsunami on the coasts of Madagascar Island, Africa

都司 嘉宣

1. はじめに

アフリカ本土の南東沖約400km 隔てて浮 かぶ日本国土の 1.6 倍の面積の Madagascar 島の海岸に,巨大津波の痕跡が見られるとい う報告が国際津波学会で初めて話されたのは, 2007 年イタリア国 Perugia で開催された国際 測地学及び地球物理学連合(IUGG)の津波 研究集会でのロシア・ノボシビルスク津波研 究所の Dr. V. K. Gusiakov の講演によるもの であった。この前年,米国ニューヨーク州 Palisades の Colombia 大学 Doherty 地質研究 所の D. H. Abbott 女史らは Gusiakov らととも に国際調査団を組織し, 2006 年に Madagascar 島に現地調査を実施していた(Abbott ら, 2006-a)。この現地調査結果とその後の研究 成果は、Abbotら(2006-b, 2010, 2011)、 Masseら (2006, 2007), によって述べら れているが、Gusiakov (2010) は、単行本 "Geophysical Hazards"の1章で、2010年 までの成果を総括している。また Abbott ら (2017) は、やはり単行本 "Sediment Provenance"にほぼ現在までのこの巨大津波痕跡 の成果を総括している。

Gusiakov 氏は,2011 年東日本震災の巨大 津波の発生の直後来日され,筆者は三陸海岸 の被災地の巡検を案内したが,その際たまた ま直接 Madagascar 島を調査されたときの様 子をお聞きする機会を得た。

以上の論文,報告に基づいて Madagascar 島南部海岸に見られる巨大津波痕跡について 解明されたことの概要を以下に述べておこう。

アフリカ・Madagascar 島, およびオース トラリア北部の Carpentaria 湾の海岸には, 巨大津波によって打ち上げられたと推定さ れる多数の V 字型の白砂の堆積砂丘が見ら れる。上述の一連の論文中ではこの「V 字型 白砂堆積砂丘」はシェブロン砂丘と呼ばれて いる。シェブロン(Chevron)の原義は軍服 のそでの細長い二等辺三角形の紋様のことで ある。本稿では、V字型というより樹木の枝 のような形をしていることが多いのでV字 型白砂堆積砂丘のことを簡略に「白砂枝」と 呼ぶことにする。このような白砂枝は、その 場所の卓越風の方向とは一致していないこと から風によって形成されたものではないこと が指摘されている。白砂枝は、砂浜海岸でな いところにも見られる。また白砂枝は、点源

(point source)から発生したと巨大津波によるものと判断される。すなわち、広域は波源 域から発する地震による津波や高潮ではなく、 海底地すべり、火山爆発、そして小惑星(巨 大隕石)あるいは彗星の落下のいずれかに成 因が限定される。そうして、多くの証拠から、 最も可能性が高いのは、隕石の落下による津 波によるものであると判断される。

注1:上述の多くの文献では「隕石(meteorite)の落下」よりも「小惑星,ないし彗星 (asteroid or comet)の衝突(impact)」と表 現されていることの方が多い。本稿ではもっ ぱら「隕石」の語で表現する。

注2:「白砂」の主成分は炭酸カルシウム CaCO₃であることが明らかにされている。硅 酸SiO₂を主成分とする自然砂ではない。

地震津波防災戦略研究所

過去 5.000 年間には 2 回の隕石の海域への 落下事件があったことが明らかになってきた。 一つは紀元前2800年ころに発生したと推定 されるインド洋への衝突事件であり、他の一 つは AD536 年(±86 年) ころに起きたと推 定されているオーストラリア Carpenteria 湾 内への衝突事件である。この2つの隕石の落 下事件にはおのおの、これらによって生じた と見られる海底クレータの候補が同定されて いる。これらのうち,インド洋に落下した隕 石の落下によるクレータと推定されるものは, Madagascar 島の南東沖約 1,500km にある直径 29km のバークルクレータ (Burckle crater) で あって、海底調査によって現在から6.000年 以内に落下したものと判明している。このク レータの位置は、(30.865°S, 61.365°E) である。このクレータからの衝突噴出物に は, 隕石の破片, 衝突の際に生じたガラス 質の物質,海洋マントルの破片,および衝突 球体(impact spherules)が見つけられている。 Madagasucar 島での実地調査による地質サン プルの C-14 法による津波発生の推定年代は 紀元前2800年ころ、すなわち現在から約4,800 年前であると判明した。すなわち,海底調査 から推定された「6,000年前以降に起きた隕 石落下」の研究成果と符合している。Madagascar 島, および Mozambique 国海岸に現れ た巨大津波は現在から約4,800年前に落下し た隕石によるものであるという事実は、ほぼ 確立されているといえるであろう。

さらに 2006 年に行われた国際調査団の成 果として, Madagascar 島の南部では津波の 遡上高は 205m に達し,海水は白砂枝の軸の 延長上で,海岸から 45km の内陸にまで達し たことが判明している。

以上が、本稿作成以前に今回取り上げる巨 大津波痕跡に関する先行研究の概要である。 このようなわけで、すでに、Madagascar 島南 端付近、およびアフリカ本土の Mozambique 国海岸の巨大津波痕跡が、今から約4,800 年 前に起きた隕石の落下が原因であることは確 実な事実として実証され承認されている、と 言ってよいであろう。

2. Madagascar 島南部海岸, および Mozambique 国の巨大津波痕跡

近年 Google Earth の性能が向上し,そこに 集積された衛星写真によって地球全体のどの 範囲でも地形の詳細が観察できるようになっ てきた。試みに茨城県龍ヶ崎市の筆者の自宅 を Google Earth で観察すると,これによって 屋根の細かな形状まで判定できる精度を持っ ていることが判明した。

さらに Google Earth で得られた画像は,画 角の隅に Google Earth のロゴが映り込んでい れば,Google 社にいちいち許可を求めるこ となく,研究論文に自由に引用できることと なった。本稿では,Madagascar 島南部海岸 の巨大津波痕跡を Google Earth の画像の上で 観察していくことにしよう。

ここで Madagascar 島 南部,および Mozambique 国海岸の巨大津波痕跡の存在する 範囲について述べておこう。

Madagascar 島の最南端は Sainte Marie 岬で ある (図1,および図2)。 巨大津波痕跡はこ の岬から東方約 200km 離れた Mahatalaky ま での海岸で、多数の白砂枝として観察するこ とができる。このことは、この海岸が津波の 波源に直接面した海岸であることを示してい る。これに対して Sainte Marie 岬から西方約 100km に位置する Androka までは、波源と 指摘されている Burckle Crater に直接向き合 う海岸線ではなく、岬の背後にあたる海岸で あるが、ここにも同じ津波による痕跡が見ら れる。ただし、この海岸での白砂枝の形状は、 Sainte Marie 岬東側の海岸とは大きく異なっ ている。すなわち白砂の堆積の形状は針のよ うな「枝状」ではなく,幅の広い舌状の形状 をしている。さらに海岸線に平行した帯状の 堆積線が海岸から離れて走っている様子が顕 著にみられる(後述)。

Madagascar 島の南海岸では、巨大津波痕 跡が観察可能な海岸区間の最東端の Androka 以北の東海岸では、ここから同島の北端に 近い Vohemar 市 Ampondra 地区までの、約 1,300km の海岸線のどこにも白砂枝は観察す ることはできなかった。ただ, Madagascar 島の北端である Ambre 岬に近い 3 点で, 巨 大津波の痕跡を観察することができた。すな わち, Ambre 岬からその南南東約 50km に位 置する Ambolobozokely, 同約 130km に位置す る Beraja, 同約 150km に位置する Vohemar 地 区 Ampondra の 3 点である (図 1)。これら の地点付近にも巨大津波の痕跡があることは, すでに Gusiakov ら (2010) の図に示されて いる。

巨大津波による白砂枝はアフリカ本土 の Mozambique 国海岸でも観察される(図 1)。巨大津波痕跡が確実に観察される北端は Mozambique 国 Maiongue 付近である。南端は, 同国の南端,南アフリカ共和国との国境に 近い Dobela Point 付近までであって,南北約 700kmの海岸線にわたって巨大津波痕跡が確 認される。南アフリカ共和国の海岸線でも巨 大津波痕跡は多少確認できた。

Madagascar 島南部の海岸線での巨大津波 痕跡が観察される海岸は、上述のように西端 は Androka から東端は Mahatelaky までの約 300km の海岸線であって、この間の海岸線 では、ほぼどの区間を観察しても巨大津波痕 跡が見られる。これに対して Mozambique 国 では約 700km の海岸線上では、とぎれとぎ れにのみ巨大津波痕跡が観察される。すなわ ち、この 700km にわたる海岸線上であっても、



図1 Madagascar 島および Mozambique 海岸 の巨大津波痕跡の存在海岸 右下の◎ 印は,巨大津波の発生源と推定される Burckle Crater 作った隕石の落下地点 (Gusiakov ら, 2010)

津波痕跡が観察されない区間がしばしば挟 まれて存在する。Mozambique 国の巨大津波 の詳細については別稿(本書中)で述べる 予定である。



図2 Madagascar 島南端付近地図(原図は航空用 百万分の一地図) 巨大津波の 痕跡は,西は Androka から東は Mahatalaky までの間の海岸線上のほとん どあらゆる地点で観察することができ る。



図3 Madagascar 島北端付近詳細地図 Ambolobozokely, Baraja, および Vohemar 市 Ampondra の3 点で巨大津波 痕跡が観察される。

Madagascar 島南部海岸の巨大津波 痕跡

この節では Madagascar 島南海岸の巨大津 波痕跡の詳細について述べるが、その述べる 順序は、地理的順序には従わず、この津波痕 跡の特徴をもっとも多彩に知ることができ る Sainte Marie 岬の東方約 70km に位置する Talaky を河口とする Mananbovo 川流域の様 子から記述を始めることにする。この点から 記述は順次東進し、巨大津波痕跡海岸の東端 である Mahatalaky に至る。その後、記述は Talaky に戻って、ここから西進して、Sainte Marie 岬を経て西端である Androka に至って



図4 写真1~18の範囲表示図

本章の記述を終わることにする。

3.1 Mananbovo 川河口付近

まず最初に巨大津波痕跡の特徴がもっとも 多彩に現れている場所として,Sainte Marie 岬の約70km 東方に位置する Talaky を河口と する Manonbovo 川流域の衛星写真を見てお こう(写真1)。

河口付近左岸にはTalakyの町がある。一 見して明らかなように、海岸から真西に向 かってV字型をした白い直線状の堆積砂丘

(以下「白砂枝」と呼ぶ)がいくつも見ら れ,白砂が海水によって打ち上げられた痕跡 と認めることができる。河口付近のA点か ら西に延びる白砂枝は白く塗りつぶしたよう なV字形がB点付近にまで伸びているのを 認めることができる。画面下の縮尺を参照す るとV字型の軸の長さAB間は約4kmであっ て海岸のA点からB点まで地面はほぼ完全 に白砂で覆いつくされていることが分かる。 さらによく見ると,この白砂枝の延長方向に 白っぽい火焔のような形がC点付近までた どることができる。BC間は,地面は白砂に 完全には覆いつくされてはいないが,やはり 津波によって海岸から運ばれてきた白砂の堆 積痕と認めることができる。A-B-Cと連な



写真1 Mananbovo 川河口 Talaky 付近の Google Earth 写真

る白砂枝の軸は Mananbovo 川の流れと交差 しているが,ひたすら直線的であってその形 成に川の流れによる地形の影響を全く受けて いないように見える。当然海岸の A 点から 川を越え B 点に至るまでに川の流れと交差 するところで,白砂枝を形成した津波による 海水の陸上への遡上流路が川の影響を多少は 受けたはずであるが,その様子は全く見られ ない。ということは,砂を運んだ津波による 海水速度が非常に速かったことを意味するで あろう。この白砂枝の向きは西 10 度北方向 である。

海岸線に眼を転じると、川の左側平野の前 面の海岸線上のD点からE点にかけて、幾 筋もの白砂枝が多数平行して並んでいるのが 観察される。川の右側平野の前面海岸のF点 からG点にかけても、幾筋ものV字型に砂 の堆積痕が連なっているのが観察される。そ うして以上のどのV字型の枝もすべてほぼ 同一方向(西10度北)に互いに平行に並ん でいることが分かる。

こんどは川の中流域左岸側の写真1のH 点付近に注目する。海岸から伸びる白砂枝を 作った津波による海水の流れは、当然砂だけ が移動したのではない。その何倍もの体積の 海水が陸に侵入したはずである。この付近は 海岸から浸入した大量の海水が平野部の峯線 (I 点から南西方向に伸びている)を越えた

あと西北西側背後で川に向かって流下して, ここで浸食を起こした形跡が見られる。すな わち,この浸食によって小さな谷筋が幾筋も 刻まれているのがわかる。

H点から見て川の対岸側のJ点付近にも, 小規模ながら白砂枝が見られる。これは, H 点付近の斜面を流下した海水が川の反対側斜 面にも浸水し,含んでいた海からの砂,ある いは川で新たに巻き込んだ砂を川の西側斜面 に這い上がるときに置き去っていったものと 推察することができる。

H点付近は峰線から流下してくる海水に浸 食を受けたことが推察されるが,その北側の K点付近の斜面にも海水が侵入した形跡が見 られる。というのは,K点から西方に向って 川筋に近いところに小規模ながらH点同様 の浸食された痕跡が認められるからである。 K点付近そのものには浸食された痕跡はない。 水の勢いがH点付近ほどには大きくなくて, K点付近では浸食を起こさなかったのであろ う。

写真1のI点の東北方向,あるいはIan-



写真2 写真1の点Aと点Eを含む海岸の拡大写真 この写真のA点,E点は写真1の各 点と同一点

baroの北方の平野部に,南東から北西に向か う幾筋もの白みがかった明るい線(以下「明 線」とよぶ)が見られる。同じ巨大津波によ る海水の流跡であって,海水中に含まれた砂 の成分が少しずつ置き去られてこのような明 線が現れたのであろう。今後現れる写真中に も白砂枝の延長の平野部を注意深く見れば, しばしば巨大津波による海水の流跡を示す明 線が見られるであろう。

川の上流に当たるL点付近の両岸の小平 野にも白砂の堆積が見られる。白砂と含んだ 津波による海水の流れはここにも及び,順次 含んでいる白砂を置き去りにして行ったので あろう。

写真2は写真1の点Aと点Eを含む海岸 の拡大写真である。ここに見られる多数の 白砂枝の長さは0.5~1.0kmであって,向 きは西5度北と西10度北の間に分布してい る。これらの白砂枝の向きは図1のBurckle Craterからここに至る直線の向きとほとんど 同じ方向であることに注意したい。すなわち, これらの白砂枝は,隕石落下点の波源から直 線的に跳ね飛んできたスプラッシュ(splash) によって形成されたのではないかと示唆され るのである。枝の幅は50m~100m程であっ て,海岸線から出発した枝同士はどれも決し て陸上で交差していないことにも注意したい。

3.2 Ambazoa 南方海岸

Talakyから海岸線に沿って東北東に約 20km 進むと, Ambazoa の南方海岸に至る。 写真1のD 点から Ambazoa の南方海岸まで を写真3に掲げる。写真3の中で、M、N、 Oの3点にやや顕著な白砂枝が見られる。こ とに、M点の白砂枝は約2kmと長く、しか も北側にこれと平行な多くの白砂枝を伴って いることが分かる。写真4はこの部分周辺を 拡大したものである。この白砂枝の北側にも 互いに平行な10本ほどの白砂枝が見られる。 これらの白砂枝の特徴は、海岸汀線の所では 比較的細いが、内陸に進行するにつれて枝分 かれしたり,太くなったりしている様子が見 て取れることである。しかも隣接する他の白 砂枝とは決して互いに接触していないことが 読み取れる。

写真4の下のスケールによって、一番南側 にあって一番長い白砂枝の長さは海岸から 2.2kmであるが、幅は50m程度しかない。そ うして枝は海岸線のあたりでむしろ細く、先 に進むほど太くなっているように見える。そ のすぐ北側には2kmほどの海岸線長の所に に10本ほどの白砂枝が密集して見られるが、 その形はやはり海岸線近くでは細く、上陸後 むしろ太くなっている。ここでもV字型の 向きは西10°北方向である。1本1本の枝の



写真 3 Ambazoa の南方海岸 M, N, O の 3 点にやや目立った V 字型砂堆積が見られる D 点 は写真 1 の D 点と同一の点である。



写真4 写真3のM点付近に見られる目立って長い白砂枝 中央に10本ほどの互いに平行で 1本1本が長い白砂枝が見える。波源から一直線に襲って来た splash のよるものであ ろう。右上の放射状に群を作っている白砂枝は、一度内陸に打ち上げられた海水が、 海に戻るとき谷筋に白砂を置き去りにして行ったものと推定される。

太さ(横幅)はどれも 50m ~ 100m 程度である。 つまり、この V 字型砂堆積の文様を作った 津波の横幅(進行方向に直角な方向の横方向 の波長)はせいぜい 100m である。このことは、 この津波を発生させた原因のスケールもまた せいぜい 100m であったと推定させる。すな わち、この津波が隕石の落下によるものであ れば、100m はその隕石の大きさを反映して いることが示唆されるのである。

これら10本ほどの白砂枝が続いた後さら に北東に海岸線をたどると、2本のやや短い 白砂枝があり、これらを過ぎて写真の右上隅 近くに、前の「10本ほどの白砂枝」とは全 く異なった小さな白砂枝の群れが見える。こ の白砂枝の群れは海岸線から放射状に内陸に 発しているように見える。この白砂枝群は巨 大津波が海から侵入してくるとき形成された 白砂枝ではなく、いったん内陸の平野に打ち あがった白砂を含んだ海水が、海に戻るとき、 小さな谷筋に沿って白砂を残していったもの であると考えられる。したがってこの白砂枝 の群を形成する枝は平行に配列されているの ではなく、それらの方向は1本1本異なって いて、しかも海岸線上の1点に放射状に集中 しているように見える。

さらに、写真4をよく見ると、この付近の 海岸は磯海岸であって、白砂枝を形成する砂 はこのすぐ前の浜から供給されたものではな いことにも注意したい。この白砂枝を構成す る「白砂」はどこから供給されたものである のかも、解明すべき課題の一つである。

写真4の約10本の白砂枝の打ちあがった 海岸は汀線から背後の畑地の拡がる平野部ま で、特に段差は無く、勾配の緩い傾斜地が長 く(2kmぐらい)続き、背後の畑地に延長 しているように見える。このような海岸では、 沖から侵入してきた splash は遮るものなく長 い枝を伸ばすことができたと見られる。とこ ろが、この約10本の白砂枝のすぐ南の海岸 には、汀線からやや急な崖状の段差があって、 背後の台地状の畑地の平野に接続しているの を読み取ることができる。このような場所で は沖からやってきた splash は、容易には長い 枝を伸ばすことができない。海岸線上に長い 枝を絶ばすことができない。海岸線上に長い になだらかな斜面が接続しているのか,それ とも崖のような急斜面が接続しているのかの 差であって,その場所へ来た津波の性質では ないと考えられる。

以上は白砂枝の形成の条件であって,海水 の浸水自体は,海岸線付近が緩やかな傾斜で あろうが,海岸線付近に崖状の段差があろう が,軽々と乗り越えて海岸線から数キロ内陸 まで侵入したと見られる。写真3では,巨大 津波による海水の浸水限界線はあまり画然と 明瞭には見えないが,(A)平野部が白っぽ く見えるかどうか,および(B)海水の流跡 を示す明線が見えるかどうか,によって浸水 限界を推定すると,海岸線からおよそ4~ 5kmの地点まで浸水が及んだと推定される。

3.3 Ambazoa-Ambavombe-Elinja間の海岸 の巨大津波痕跡

Ambazoa か ら 東, Ambavombe を 経 て Elanja までの約 40km の海岸線の様子を写真 5 に掲げる。写真 5 の N 点, O 点は写真 3 の 両点と各同一点である。この写真 5 で注目さ れるのは, V 字型堆積砂のほかに, 海水の浸 水限界線と推定される色調の急変する線が明瞭にみられることである。すなわち,P1~ P5を連ねる線がそれである。この線より海 側は山側に比べて明瞭に白っぽく,かつ海水 の流跡を表す明線があちこちに見られるので ある。この線と海岸線の間に挟まれた平野部 に、ところどころに斑点のように見えるのは, 畑地の平野部に散在する樹木の茂った小丘で ある。

ここで一つ気が付くことがある。それは, 浸水限界線より海の側には,樹木はこれらの 小丘以外の場所にはほとんど見られないのに 対して,この浸水限界線より内陸側には樹木 は,濃淡のある分布をしていて散在している ことである。すなわち,この巨大津波の浸水 域には丘にしか樹木がないのに対して,浸水 域でない場所には自然に樹木が平野部にも散 在していることである。何らかの理由で,巨 大津波の浸水域では樹木の生育が妨げられて いるように見える。

写真5のN点とO点の間の詳細写真を写 真6に掲げる。この間は海岸の汀線の背後か



写真5 Ambazoa・Ambovombe・Elanja に至る約40kmの海岸線 N点,O点,及びQ点にやや 顕著な白砂枝が見られる。P1 ~ P5 を結ぶ線で,海岸側と内陸側で色彩が急変している。 またこの線より海側の平野には、巨大津波の流跡を示すと思われる白っぽい筋模様が見 られる。また、多数の黒っぽい斑点は、樹木で覆われた小丘陵である。R点付近で、海 岸に接して存在する小丘陵に白砂枝が這い上がっている。



写真6 写真5のN点・O点間の詳細写真 この写真のN点とO点は写真5の各点と 同一点である。

らすぐ崖状の急斜面になっていて、畑地の平 野はこの急斜面の上の台地の上に拡がってい る。

写真6の範囲の海岸は、海岸汀線の背後に 崖状の急斜面が迫っている場所で、その上に 畑地が台地上に拡がっている。この場所で は、N、N1、N2、N3、N4、およびOの白砂 枝は急斜面の上端に達してはいない。さらに これらの白砂枝の軸の方向はこれまでの写真 の白砂枝とは異なって、西10度北方向に揃っ てはおらず、急斜面の谷の線に従っているよ うに見える。このことはつまり、写真6の6 本の白砂枝は,Burckle Crater の波源から直 線的にやってきた splash によって出来たもの ではないことを示している。この6本の白砂 枝は,津波によって海水がいったん台地の上 に打ち上げられ,それが海に戻るとき谷筋に 従って流れ出る際,含まれていた白砂が谷筋 に置き去りされたものと推定される。

写真7は、写真5のQ点付近の拡大写真 である。この付近は海岸汀線の背後には緩や かな傾斜面が台地面まで続いている。多数観 察される白砂枝はほぼ長さ1km前後,西20 度北方向に揃っていて、わずかに見える小崖



写真7 写真6のQ点付近の拡大写真

面の谷筋方向を無視して塗りつぶすように 配列している。白砂枝の幅は 50m から 200m 程度と観察される。ここは、谷筋や川筋の影 響を無視するかのように波源から直線的に到 達した splash を反映した白砂枝となっている。

この写真7では、白砂枝の延長部分の畑地 に、明線が接続してそれらの延長上に延びて いることに注目したい。巨大津波のとき海 から運ばれてきた大部分の白砂は、海岸か ら1km ほどの間に白砂枝として置き去られ たと推定される。海水はさらに内陸に浸水し た。内陸の浸水域に残された明線は、このと き海水中に残って含まれていた少量の白砂が 流れる途中で順次置き去られていったことを 物語っている。

写真8は、写真のR点の周辺の拡大写真 である。ここは海岸線に接する位置に樹木で 覆われた小丘陵があり、津波によって運ばれ た白砂がこの小丘陵の南斜面を這い上がって いる様子が映されている。白砂の堆積はほぼ この小丘陵の頂上付近にまで迫っている。こ の小丘陵の左側の汀線付近を観察すると、こ こは海岸線に小さな崖が迫っている地形であ ることが分かる。P5点は写真5のP5点と同 一点で、海水の浸水限界を示すと推察される、 地表の明度が急変するところである。写真5 と合わせてみると、津波による海水の到達の 限界線は、この小丘陵の背後で大きく海岸線 に近づいていることが見て取れる。すなわち、 この小丘陵によって海水の浸水が大幅に阻ま れたことを示している。

3.4 Mandrare 川河口付近

写真5の東に隣接するElanjaとMaroloha 間の海岸の写真を写真9に示す。この写真 ではこの地方最大の川であるMandrare川の 河口が写っている。写真のR1点の所に長さ 2kmの顕著な白砂枝が写っている。この白砂 枝の向きも西10度北である。

Mandrare 川の河口周辺の平野部では大規 模な巨大津波の浸水痕跡が残っている。S1 と記された平野付近は幅広く白砂で覆われつ くしている。白砂の帯の向きは西15度北で ある。

白砂で完全に覆いつくされた範囲は Mandrare 川までであって、川の西側平野は白砂 で覆いつくされてはいない。しかし、川の東 岸の平野に侵入した多量の海水侵入は川の西 側の平野部にも広範に侵入した痕跡が認めら れる。

海水は沿岸平野北側の峰線部分を超えて北 上したと推定され、T1と記したあたりの北 へ下る勾配の地域には、谷筋の浸食を起こし た形跡が見られる。さらに、浸食を起こし



写真8 写真5のR点付近の拡大写真 ここは海岸線に接して樹木で覆われた小丘陵があり,津 波によって運ばれた白砂がこの小丘陵の南斜面を頂上付近まで這い上がっている。



写真9 Mandare 川の河口付近 Elanja と Maroloha 間約 15km の区間を含む海岸

て谷線を掘り下げた形跡は T2, T3 のあたり にまで及んでいる。T3 は海岸線から約 10km もの内陸に位置する。

同様の浸食は Mandrare 川に東岸側の平野 にも及んだと見られ,海水は T4 付近の平野 部を北向きに通過した後 T5 付近の丘陵部の 周囲にも T3 と同様の浸食痕跡が見られる。

さらに T4 付近の流跡をたどると海水は Lake Anonyを南から北西へと通過しいてっ たと推察される。

3.5 Tolanaro 空港付近

Maroloha から東 Tolanaro 空港まで(図2 参照)の約40kmの海岸線は、山地が海岸線 に迫っているためか、白砂枝の巨大津波痕 跡はほとんど見られない。Toranalo 空港南方 に巨大津波痕跡と見られる白砂枝は、長さ 1km ほどの主要なものが2本、小さなものが 数本、何れも平行して伸びているのが観察さ れる(写真10)。海水の流跡を示す幾本もの 明線が何本も同じ方向に延びていて背後の潟 湖に達しているのが観察される。ただし、白



写真 10 Tolanaro 空港南方海岸に見られる白砂枝 U 点のところ

砂枝,およびその延長部で海水の流跡を示す 明線とも,向きは西20度南であって,これ まで見てきた白砂枝の方向とは一致していな い。また,図1に示したような波源とされる Burckle Craterからの直線方向とも一致しな い。

3.6 Mahatalaky の津波痕跡

Madagascar 島南部海岸で,津波痕跡が見 られる最東端は Mahatalaky の海岸である(写 真 11)。白砂枝の巨大津波痕跡はこの写真の V 点(写真 12),及び W 点(写真 13)で観 察することができる。 写真 12 には V1, V2, V3 のあたりに白砂 枝の群が見られる。ただし、この写真で見る 限りその長さはせいぜい 100m 程度で、幅は 10m 程度の小規模なものである。Maroloha 以西 Talaky までの海岸の各所に見られた、 長さ 2km かそれ以上、幅 100m の規模のも のと比べれば、非常にささやかなものである。

しかしながら、写真をよく見るとその背後に海岸線に平行に細長い潟湖が走っており、その西側の対岸側にも V4、V5、V6 のあたりに白砂枝の延長部のような文様が現れているのが分かる。Burckle Crater 隕石の 落下から 4,800 年を経過していることを考え



写真 11 Madagascar 島南部海岸最東端の Mahatalaky 付近の巨大津波痕跡の観察点



写真12 写真11のV点付近の詳細写真



写真13 写真11のW点付近の拡大写真

れば、V1 ~ V3 のすぐ背後の砂丘上の樹木 は巨大津波来襲直後には存在せず、V4 ~ V6 に見られる白砂枝と一つながりであったもの が、その後砂丘上の樹木が繁茂して白砂枝の 途中が隠されたものと理解すれば、ここでも 白砂枝は長さ1~2kmのものであった可能 性がある。

写真11のW点付近の拡大写真を写真13 に示す。海岸付近にはW1点をはじめとし て、長さ100m程度の白砂枝が何本も見られ る。しかし、どれも規模が小さい上に、白砂 枝がお互いに平行に並んでいるとは言えない。 ところが沿岸砂丘に樹木が帯状に繁茂してい る背後の W2 点付近には、白砂の堆積がある ことを樹木越しに観察することができる。そ のさら背後にはW3、W4の大きな白砂の堆 積が見える。これらは海岸線から約 500m 離 れた場所にある。このことは,巨大津波が襲っ た直後には、白砂は海岸線から1km あたり まで堆積していたが、その後の4800年の経 過のうちに中間に植物が繁茂して他の海岸で 見られたような立派な白砂枝としての姿が失 われたものと理解することができるであろう。

3.7 Manambovo 川河口以西 Faux 岬まで

それでは今度は、写真1に掲げた Mananbovo川の河口から西に向かって海岸線の様 子を見て行こう。写真14は、Faux(フォー) 岬までの写真である。写真右端のA点は、 写真1のA点と同じ点である。この写真にも, ほぼ真西に向いた白砂枝が多数現れている。 特にX点付近には顕著な白砂枝が現れている。 X点付近の詳細写真を写真15に掲げる。X 点から真西に向かう一番顕著な白砂枝の,「地 上を完全に白砂で覆い尽くした枝」の先端は この写真のX1点のあたりまでであって,こ こまでの枝の長さは約1kmである。しかし ながらそこからさらにX2点付近まで少し薄 らぎながらも白砂枝は続いているのが観察で き,ここまでの枝の長さは海岸のX点から 約2.5km ある。X3の所では,平地中の小丘 陵を両側から背後に海水が回り込んだ様子を 読み取ることができる。

3.8 Faux 岬から Sainte Marie 岬を経て Lavanono まで

Faux 岬から Madagascar 島最南端の Saite Marie 岬までは,西5度南方向のほぼ直線 状をなしている。これに対して,巨大津波 の splash の入射角は西 10 度北方向であって, この両者の交差角はわずか 15 度程度しかな い。このため,巨大津波のとき浸入してきた 海水は,元と同じ海岸線に戻ることなくその まま陸上を西進して Sainte Marie 岬の西側の Lavanono までの間の海岸線に排出した。そ の様子が,この間約 60km の海岸線の写真 16 に明瞭に見ることができる。すなわち,写真 16 の Y1 点付近から西に向かって海水の浸入



写真 14 Mananbovo 川河口からその約 20km 西に位置する Faux 岬までの海岸の光景



写真15 写真14のX点付近の詳細写真

が始まり、Saite Marie 岬の北側の背後の台 地を西向きに通り抜けてY4点付近の海岸線 に排出したようすをたどることができる。こ の海水の浸入に伴って生じたY1点からY2 にいたる海水の浸入限界線を明瞭に判別する ことができる。

Sainte Marie 岬付近の拡大写真を写真 17 と して掲げる。岬の付近は両側とも崖海岸と なっているが,東側海岸の Y3 点付近には, 崖下の狭いわずかな平坦面に白砂枝が打ちあ がっている様子を観察することができる。

白砂は崖下に枝状に堆積しているが海水は 崖の上面にまで侵入し,岬の西側の海岸線に 排出したものと推定される。そのさい,西側 の海岸のY4付近では流下してくる海水のた めに浸食が起きて谷筋が刻まれている様子を 読み取ることができる。

Y4 点よりさらに西に進んだ海水は、や がて台地の上面の下を西進する流れとなっ て、Y5 点付近では崖下が浸食され、この付 近の崖の上端に「迫り出し overhanging」地 形が生じているように見える。写真 16 を見 ると、このような崖上端の迫り出し地形は Lavanono の近くにまで及んでいるとがわか る。



写真 16 Faux 岬から最南端 Sainte Marie 岬を経て Lavanono に至る約 45km の海岸線の衛星写真



写真 17 Sainte Marie 岬付近の拡大写真

3.9 Lavanono 以西 Androka までの海岸の 巨大津波痕跡

いよいよ Madagascar 島南部海岸の津波痕跡 区域の最西端である, Lavanono から Androka までの約 70km の海岸線を見て行こう(写真 18)。この海岸線は Burckle Crater の波源から 見て, Saint Marie 岬の背後に当たっている。 したがって直線的に来襲する splash 性の津波 の直撃は受けていないはずである。このこと を反映して,この海岸線では Sainte Marie 岬 の東側海岸で見られたような細長くとがった 枝状の自砂枝群は見られず,自砂堆積砂丘は 幅広の「舌状」の形状をしている(Z1,Z2 間, 及び Z3 付近)。Z1 点から Z2 点までの拡大 写真を写真19に示す。白砂の浸水堆積の形 状は,Sainte Marie 岬の東側海岸で頻繁に見 られたような,白砂枝とは全く異なり,幅広 の舌状をしていそのうえ,この白砂堆積舌の 長さは,3kmから4kmほどにも及んでいる。 写真19の縮尺は,例えば写真3の縮尺とほ ぼ同一である。写真3に現れた白砂枝と写真 9の白砂舌とを比較して両者の大きな違いに 注目すべきである。

Z1 点から西40 度北方向に延びた長方形状 の白砂堆積にも注目したい。海岸側の東の終 端部は「鱗状」に断続しているが,明白に北 西向きの海水の置き去りにして行った白砂の 堆積物であることが見て取れる。



写真 18 Lavanono 以西 Androka までの海岸



写真 19 写真 18 の Z1, Z2 付近の拡大写真



写真 20 Z3 点および Linta 川流域の詳細写真

写真 20 は Z3 点,および Linta 川流域の詳 細写真である。Z3 点付近にも舌状の白砂の堆 積が見られ,その長さは約 1km に及んでいる。

この写真で注目すべきは,Linta 川流域の Z7 点付近である。ここには両岸に津波によ る海水のLinta 川筋への降下流によるとみら れる浸食によって生じたと推定される細かい 谷筋地形を観察することができる。巨大津波 による海水侵入は,この付近の川の両側の台



図5 Madagascar 島北端付近3点の写真範 囲の Index

地の上にまで及んでいたのである。

Madagascar 島北端付近の巨大津波 浸水痕跡

図1に示したように、Madagascar 島では東 西約300km にわたる南端海岸のほかに、そ れから約1,300km もの距離(東京・奄美大島 間に等しい!)北に離れた、Vohemar 市周辺 の3点にも表れている。すなわち図3に示し た Ambolobozokely, Beraja, および Ampondra の3点である(図5参照)。 Madagascar 島北端の Ambre 岬の南東約 50kmに位置する Ambolobozokelyの東側半島 の先端付近とその北側の離島に見られる白砂 枝状の巨大津波痕跡を写真21に示す。NA1点, および離島上の NA2 点に白砂枝の群が見ら れる。写真22に NA1点の拡大写真を掲げる。 各々の地点の最長の白砂枝の長さはともに約 1kmで,幅は100m程度と観察される。白砂 枝の向きはともに西55度北方向を示してい る。これは,ほぼ Burckle Crater からの直線 方向である。海水は,各白砂枝の到達限界を 超えて,半島,および島全体を通過して北西 方向に流れ去ったものと推定される。

4.2 Beraja 海岸の巨大津波痕跡 Madagascar 島北端の Ambre 岬の南南東約



写真 21 Madagascar 島北端 Ambre 岬の南南 東約 50km に位置する Ambolobozokely の巨大津波痕跡 (NA1 およ び NA2)



写真 22 写真 21 の NA1 点付近の拡大写真

130km にある Beraja の海岸にも巨大津波に よる白砂枝がやや大規模に見られる(写真 23)。白砂枝の群が見られる NB1 点付近を拡 大した写真を写真 24 として掲げる。

最も長い白砂枝(NB1点付近)は長さ 4kmにも達する。その方向は西65度北である。 そのすぐ南にも長さ1.5km 程度の白砂枝が2 本見られる。こちらの2本の方向は西55度 北である。 NB2 点から内陸に入り NB3 点に至る範囲 の写真を掲げたのが写真 25 である。NB2 点 と NB3 点の中間に写真 25 の NB4 点付近に 北側に向かって掘ったような谷筋が 4 本平行 して並んでいるのが見える。その先が NB3 の台地上の流水痕跡に接続しているので,津 波のとき南東方から上がって来た海水が峰線 を越えて北側の斜面に降下するとき,浸食が 起きて出来たものと推定される。NB3 の台



写真 23 Madagascar 島北端 Ambre 岬の南南東約 130km の Baraja 付近に 見られる巨大津波痕跡 (NA1 点,及び NA2 点)



写真 24 写真 23 の NB1 点付近の拡大図 一番長い白砂枝の長さは約 2km, 方向は西 55 度北である。



写真 25 写真 23 の NB2, NB3 点付近の拡大図 海岸の NB2 点付近では,海岸 に幅約 1km に達する白砂の「帯」が見られる。NB4 の所に,4本の浸 食でできたとみられる谷地形が見られる。方向はいずれも西 55 度北で ある。

地面の上の筋模様は津波の海水の流出痕跡を 示していると考えられる。NB3 面の流水方 向も NB4 の浸食で生じた谷筋の向きも西 55 度北である。

4.3 Vohemar 地区 Ampondra の巨大津波痕 跡

前項の Beraja から約 20km 南下すると Vohemar 市に着く。ここには Vohemar 空港もあ るこの地方の中心となる小都会である。Vohemar 市の中心市街地から約 5km 南に Ampondra 地区がある(写真 26)。この地区には, 写真 26 の NC1, NC2, NC3 の 3 点に巨大津 波による白砂の堆積を示す痕跡がある。

NC1 点付近の拡大写真を写真 27 として示 す。NC1 点では,海岸から浸入してきた白 砂によって,海岸線に平行して走っていた樹 木帯が分断されているように見える。さらに, この分断樹林帯の南側に接して,海岸汀線か らの長さが 500m ぐらいの短い白砂が枝 3 本 が見える。これも方向は西 55 度北を向いて いる。これらの白砂枝の終端は海岸線に平行 に南北に走る樹木の帯を隔てて,広範に砂で 覆われている平原が広がっている。この平原 を覆う砂もまた、巨大津波によって運び込ま れた砂であると推定される。この砂の堆積 地の限界は海岸線から約 1km ぐらいである が、そのさらに背後の樹林地帯と白く見える 畑地にまで海水侵入が及んだものと推定され る。その白い畑地の限界線は海岸汀線から約 2km あたりにまで及んでいる。

NC2 点付近の拡大写真を写真 28 として示 す。NC2 を記した点のあたりで樹木林の中 に長さ 500m ほどの白砂枝が 8 本ほど見える。 さらにこの背後に広大な砂で覆われた平原が 広がっており、写真画角の左上縁にまで達し さらにもっと内陸にまで広がっている。砂 の浸入は海岸線から 5km の地点を超えてい たと推定される。写真 26 と合わせてみると, 砂で覆われた範囲は Ampondra の中心市街地 にまで迫っていたようである。

写真 29 は NC3 点の付近の詳細写真である が,NC3 と書かれた点のあたりで 3 本ほど 海岸樹林帯のなかに白砂枝が侵入しているの を観察することができる。巨大津波の発生後 今日までの約 4,800 年間の樹林の拡大によっ て,白砂枝は明瞭な線分をなしていないが, それでもその方向は西 55 度北であったこと



写真 26 Vohemar 市 Ampondra 地区の津波痕跡のある場所 (NC1, NC2, および NC3)



写真 27 Ampondra 地区の NC1 点



写真 28 Ampondra 地区の NC2 点



写真 29 Ampondra の NC3 点の白砂枝 (NC3 の文字の場所の左方)

を認めることが出来る。ここでも、樹林の背 後に、巨大津波によって運ばれた砂によって 砂によって覆われた広大な平野部が続いてい ることを見て取ることができる。

5. 白砂枝の向きだけから波源点を推定 すると?

Madagascar 島の南海岸と北端付近に多数の 白砂枝の巨大津波痕跡を残した津波の震源は, Burckle Crater 付近の海底調査と, Madagascar 島での現地調査から Madagascar 島の南東約 1,500km に位置する Burckle Crater を残した隕 石の落下によるものであることは, すでに Abbott ら (2006), および Gusiakov ら (2010)



図 6 Taraky 点での白砂枝の方向(西 10 度北) と Beraja 点での方向(西 55 度北)を, おのおの逆方向に延長すると図の P 点 (南緯 27.5 度, 東経 61.2 度)で交差する。

によって確定していると言ってよいであろう。 しかしながら、この事実を知らないものとして、 巨大津波の痕跡である白砂枝の向きだけから 波源点を推定するとどうなるであろうか?

Madagascar 島南部海岸の Talaky 点での多 数の白砂枝の方向は西 10 度北方向であった。 これに対して島の北端に近い Beraja 点での 方向は西 55 度北方向であった。このつの白 砂枝が波源点からの直線方向であると仮定し, この2 個の線を逆方向に延長すると,交点と して図 6 のP点が得られる。その位置は(南 緯 27.5 度,東経 61.2 度)となる。図 6 で見 られるようにこの点は,Burckle Crater から 350km ほど北北西の点であるが,方向測定の 誤差を考えれば両者の位置はほぼ一致してい るとみなしてよいであろう。

この事実から考えれば、この隕石津波は、 波源から直線的に海岸に到達し、しかも到達 点で波源からの方向をほとんど変えずに陸上 に自砂枝の堆積紋様を残したこととなろう。 ここでは、経路途中の海底地形の影響、こと に海岸線に近い海域での屈曲はほとんど起こ してはいないことになろう。

6.考察

隕石の落下によって生じた津波は,波長が 隕石そのものの大きさ程度と短く,波の性質 は深水波として進行したと考えられる。波長 が短かい津波として核実験の津波があり,そ の場合には Cauchy-Poisson 波と呼ばれる高 度な分散性の波が発生する。しかし,隕石落 下による津波は,指向性(directivity)が強 く現れるらしく,今回取り上げた津波の場合 には,Burckle Crater から Madagascar 島南岸 を結んだ線の方向には大きなエネルギーが発 散されたが,それ以外の方向にはあまりエネ ルギーが発散されなかったようである。隕石 津波の指向性は,隕石の飛来方向の反対方向 に強くエネルギーが発散され,この方から少 しでも角度のある向きにはあまりエネルギー が発散されないようである。これが Madagascar 島の東海岸ではほとんど巨大津波の痕 跡が現れていない理由なのであろう。

これまで, 隕石落下による津波は6千万年 前に生じた中生代白亜紀末の恐竜を消滅させ た KT 境界の事例が知られており、さらに古 生代二畳紀末(約2.2億年前)の生物大消滅 の事例が知られるようになってきた。このよ うな例しか知らないと隕石落下による巨大津 波は1億年に一度程度の出来事に過ぎず,発 生確率が小さすぎて現実的な津波災害対策の 対象にはならないと考えられてきた。しかし, 2006 年から Gusiakov や Abbott などによって 見いだされた 4,800 年前の Madagascar 島の 巨大津波,および約1.400年前のオーストラ リア Carpentaria 湾の巨大津波など隕石落下 による津波の頻度は一億年に一度の出来事で はなく、少なくとも 5,000 年に 2 度の出来事 が発見・調査された。すなわち、隕石落下に よる巨大津波は 2,000 年に1 度程度は起きて いることが判明した。そうである以上、隕石 落下による津波現象もまた 2011 年東日本震 災と同じような千年津波(ミレニアム津波) への対策と同じように現実的な防災対策の対 象とすべき現象であることを、われわれは認 めなくてはならないであろう。

アメリカ,ロシアの津波研究者の間には, すでに隕石落下による津波は現実的に起きて いる災害現象として知られ,熱心に議論がな されている。しかしながら世界的な津波研究 先進国と自認してきた我が国の津波研究の分 野ではここに取り上げたような 5,000 年に 2 度の隕石津波については話題になったことす らない。これでは日本の津波研究には、気が 付いたらいつの間にか世界の津波研究から取 り残されている面があることが痛切に感じら れる。

隕石落下による津波のふるまいに関して言 えば、従来の長波近似を第一近似とするこれ までの津波理論研究の蓄積はほとんど役に立 たないだろう。すなわち、隕石落下による水 中衝撃波と津波の発生, 伝播法則の理論につ いては,数値計算手法はほとんど存在しない に等しいのである。毎秒10kmかそれ以上の 速度で,斜め方向から海洋に落下してきた直 径 100m 程度の岩塊からなる隕石は, 落下直 後には当然海水に強烈な衝撃波を起こしたに 違いない。また、この津波の指向性から考え て、この津波は進行方向には波長の長い長波、 進行直角方向には波長の短い深水波であった と思われるが、このような海洋波は理論的に どういうふるまいをするのであろうか?本稿 で取り上げた隕石落下による津波発生現象を 現地調査、海底調査、画像解析など観察の面 から,あるいは理論考察や数値計算など面か ら未知の問題が山積しているこの研究を、と くに若い津波研究者によって力強く取り組ま れることを切望して筆を置く。

7. 謝辞

Google Earth の画像を編集され,一般に公開され,それを研究論文に自由に引用することを許可された Google 社にまずお礼を申し上げたい。また,貴重な情報をいただいたDr.V.K.Gusiakov にも深謝したい。本稿は筆者が2022年12月,関西大学大阪梅田校舎で実施された巨大津波に関する研究発表会で発表し,その後の成果を加えたものである。この機会を与えてくださった各位に感謝の意を表したい。

参考文献

注記:この文献表には, Madagascar 島隕

石津波痕跡に関するものを載せ、多数存在す るオーストラリア Carpentaria 湾の隕石津波 に関する文献は載せなかった。また、アメ リカ合衆国内で開催された学会の予稿集の abstract 類も、この文献表には載せなかった ものがいくつか存在する。

Madagascar 島東海岸は雨量が多い地域で あると判明した。東海岸で退跡が見られな かったのは多い雨量のため海岸付近の森林で 樹木の育生が急なため,4,800年間の時の経 過のうちに消滅したためである可能性がある。

- Abbot, D.H., E.A.Bryant, V.K.Gusiakov, and H. Razafindrakoto, 2006–a, Report of Interantion– al Tsunami Expedition to Madagascar, (techni– cal report)
- Abbot, D.H., S.Martos, H. Elkinton, E.F. Bryant, V.K.Gisiakov, and D. Breger, 2006-b, Impact craters as sources of megatsunami generated chevron dunes, GSA-2006, Philadelphia Annual Meeting.
- Abbot, D.H., E. Bryant, and V.K. Gusiakov, and B. Masse, 2010, Largest natural catastrophes in Holocene and their possible connection with comet-asteroid impacts on the Earth, 6th Alexander von Humboldt International Conference

on Climate Change, Natural Hazards, and Societies, held at Merida, Mexico, March 2010

- Abbot, D.H., V. K. Gusiakov, Gerard Rambolamanana, and K. Galinskaya, 2017, What are the origin of V-shaped (Chevron) dunes in Madagascar? The case for their deposition by a Holocene megatsunami, "Sediment Provenance", 155-182.
- Gusiakov, V. K., D.H. Abbot, E, A.Bryant, and D. Breger, 2010, Mega tsunamis of the World oceans: Chevron dune formation, Micro-ejecta, and rapid climate change as the evidence of recent oceanic Bolide Impacts, Geophysical Hazards, Springer, 197–227
- Masse W., E. Bryant, V.K. Gusiakov, and L. Burkle, 2006, Holocene Indian Ocean cosmic impacts: The Megatsunami Chevron evidence from Madagascar, AGU fall meeting abstracts, 1224
- Masse W. B., R. P. Weaver, D. H. Abbot, V. K. Gusiakov, and E. A. Bryant, 2007, Missing in action? Evaluating the putative absence if impacts by large asteroids and commets during the Quaternary Period, Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui Hawaii, E-79 I