

ハワイの津波堆積物

—アメリカ地質学会コルディレラ分科会および巡検に参加して—

佐竹健治¹⁾

1. はじめに

ハワイと聞くと何を連想されるだろうか? 地球科学に興味のある人ならば, ホットスポット, キラウエア火山などをまず思い浮かべることだろう。ハワイには, 火山以外にも地球科学的に興味深い特色が数多くある。ここでご紹介するのは, 最近発表された衝撃的な仮説に関する話題である。ハワイ周辺の巨大海底地すべりによって津波が発生し, サングがハワイ諸島の海拔300m以上まで運ばれたというものだ。

去る5月に米国地質学会コルディレラ分科会がハワイ島で催され, 海底地すべりと津波に関するシンポジウムが開かれた。筆者はこれに参加し, 上述の海底地すべりによる津波堆積物に関する賛否両論を聞くことができた。また学会の後には, モロカイ島, ラナイ島への巡検に参加し, 津波堆積物と主張されているものを実際に現場で見る機会にも恵まれた。この学会および巡検の様子もあわせてご紹介したい。

2. 地球科学的にみたハワイ

ハワイ諸島は大小8つの島からなる(第1図)。ハワイは典型的なホットスポットで, マントル深部から物質が供給されており, 南東端のハワイ島では現在も活発な火山活動が続いている。ハワイを載せる太平洋プレートは北西方向へ年間10cm程度の速さで動いているので, ハワイ諸島は北西へ行くほど古い。ホノルルのあるオアフ島は, ハワイ島から約350km北西にあり, その年代は約350万年前である。最も北西にあるカウアイ島より先は, 浸食に

よって削られ海上には姿を現してはいないが, 海山列が連なっている。

ハワイ諸島の地質はスターズ氏によって精力的に調べられた(Stearns, 1985)。彼はもともと火山学者であったが, 1930年代から40年代にかけての16年間, 主に地下水調査の目的でハワイ諸島をくまなく調べた。彼の論文で最も古いものは1925年, 最も新しいのは1978年に出版されているので, 実に50年間以上にわたって調査結果を論文として発表し続けたことになる。

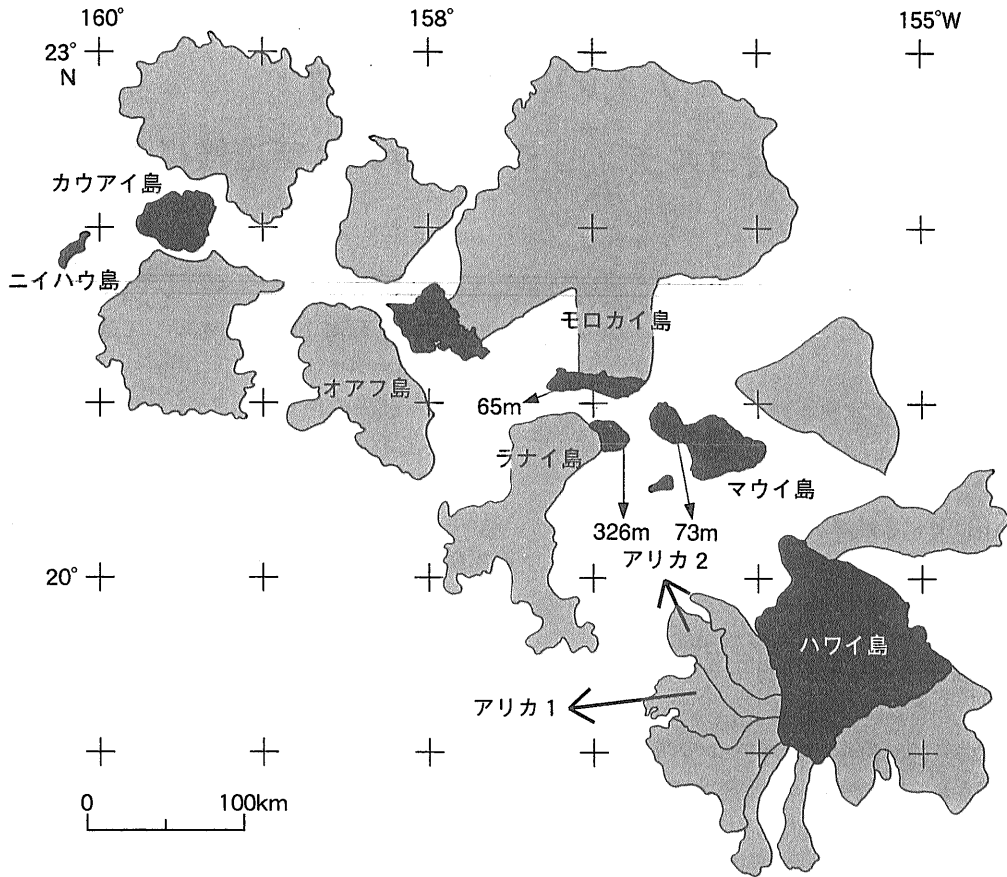
スターズ氏の調べたハワイ諸島の地質の中で興味深いものの1つは, ラナイ島の海拔326mの地点で発見されたサングを含む海成礫岩であろう。これはハワイ諸島のみならず, 中央太平洋の島々の中では最も標高が高いものである。彼はこれを旧汀線を示す堆積物であると解釈したが, その説明のためには300m以上にもおよぶ海面変動が必要である。

この海成礫岩は米国地質調査所のモーア兄弟によって再び調べられた(Moore and Moore, 1984)。彼らは, モロカイ島の海拔最高65m, マウイ島の海拔最高73mでも似たような海成堆積物を発見した。そして, これらは旧汀線を表すのではなく, 鮮新世に起きた海底地すべりによって発生した津波によって運ばれた, と解釈したのだ。

ハワイ諸島周辺で巨大な海底地すべりが発生したことは, 1980年代後半に始まった米国の二百海里経済水域の調査で明らかになった。米国地質調査所はグロリア(GLORIA)と呼ばれるサイドスキャンソナー(水深5kmで幅50kmを探索できる)を使って, ハワイ諸島周辺の海底地形・底質図を作成した(Moore et al., 1994)。その結果, 第1図に示すよ

1) 地質調査所 地震地質部

キーワード: ハワイ, 津波, 津波堆積物, 海底地すべり



第1図 ハワイ諸島と周辺の海底地すべり跡。ハワイ諸島は、黒く塗った大小8つの島からなる。網目で示すのが海底地すべり跡。島の面積よりもずっと広い海底が地すべり跡で覆われている。ハワイ島西方のアリカ1, 2すべりによって引き起こされた津波が、ランアイ、モロカイ、マウイ島で陸上までサンゴや貝殻を運んだとされている。地図の数字は、津波堆積物が発見された最高の海拔を示す。

うな数多くの巨大な海底地すべり跡が発見された。例えば、オアフ島とモロカイ島の北には長さ200kmにもわたる地すべりの跡が見られる。地すべり堆積物で覆われる総面積はハワイ諸島の数倍にも達し、一つの地すべり堆積物の体積は、海上に出ている島の体積の数分の1にもおよぼほどである。

3. ハワイと津波

ハワイは太平洋のまん中にある。太平洋の周囲はほとんどが沈み込み帯で、巨大地震が発生する。これらの地震によって発生した津波は、太平洋を渡り、ときには対岸にまで被害をもたらす。従って、ハワイはこれらの津波から逃れられない運命にある (Dudley and Lee, 1988)。

1946年にアリューシャン列島で発生した地震からの津波は、エイプリル・フールの早朝にハワイ諸島を襲い、約160名の命を奪った。ハワイ島のヒロでは津波の高さは10m程であった。ヒロでは1960年チリ地震からの津波でも60人の犠牲者を出した(この津波は地震発生からまる一日後には日本にも到着し、死者・行方不明者約140人という大被害を出した)。

1946年の津波のあと、太平洋津波警報システムが作られた。これは米国本土、アラスカ、ハワイに設置された地震計と、これらの場所に加えて太平洋の島々に設置された検潮所とからなり、本部はホノルルにある。津波を起こすような地震が観測されると、まず津波注意報を発令、どこかの検潮所で実際に津波が観測された場合は津波警報に切り替

える, というシステムだ. 当初は米国領のみを対象にしていたが, 1960年のチリ津波および1964年のアラスカ地震津波が太平洋周辺の国々に被害を与えた後は, 国際的なデータ・情報交換をするようになった. 日本の気象庁も, 南米などの地震に対する津波警報は太平洋津波警報センターからの情報に大きく依存している.

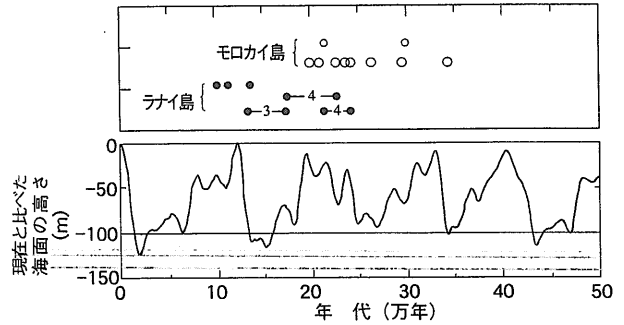
過去の津波被害を参考に, 津波対策も講じられてきた. ハワイの電話帳(ホテルの各部屋に備えられている)には全島の海岸について津波の浸水予測図が載っている. これは今世紀にハワイを襲った津波データ(高さは最大10m程度)に基いたものだ. 太平洋の周辺で巨大地震が発生した後, ハワイに津波が到達するまでには最低4時間程度の余裕がある. 津波浸水域にいる人々は, この間に避難することができると考えられている. ハワイ周辺の地震によって津波が発生することもある(1975年にはハワイ島の南東岸でマグニチュード7.5の地震が発生, その津波によって, 付近でキャンプしていたグループの中の2名が犠牲になった)が, その津波の高さも10m以下であった.

モーア達の仮説では, ハワイ周辺の海底地すべりによって発生した津波がサンゴなどを海拔300m以上まで運んだという. これは, これまでに知られていたハワイの津波に比べると, 想像を絶する大きさである. 従って, この仮説に対する人々の反応は, “非常識に大きい!” というものであった.

4. ハワイ島での学会—津波堆積物に関する論争

今年(1997年)の5月21~23日にかけてハワイ島のコナで開かれた米国地質学会コルディレラ分科会では, 「地すべりと津波」というシンポジウムが設けられた. この中で, ハワイの津波堆積物に関する賛否両論の議論に半日が費やされた.

先のモーア氏や米国本土の大学の研究者たちは, 海成礫岩が津波によるものである, と重ねて主張した. 最近のさらに詳しい調査によると, モロカイ, ラナイ両島のサンゴ碎屑物の年代は, 10~30万年の幅を示し, 一回のイベントで説明するのは難しくなってきた(第2図). 一方, ハワイ周辺の海底には多数の巨大海底地すべり跡が見つかり, ハワイ島から西へ延びるアリカ(Alika)地すべり(第1



第2図 ラナイ島, モロカイ島で発見された海成礫岩の年代(上). ほとんどがウラン同位体を用いて測られた. 下は過去50万年間の海水面の変化. 現在の海面をゼロとしてある. Moore et al. (1997)による.

図)は20~25万年前(ステージ1)と約10万年前(ステージ2)とに発生したこともわかってきた. これらの新しいデータから, モロカイ島の堆積物はアリカすべりのステージ1によって引き起こされた津波で, またラナイ島の堆積物はステージ2による津波によって運ばれたと解釈されている.

これに対し, 地元ハワイ大学の研究者たちは津波堆積物説に反対する人が多かった. 海成礫岩が津波によるものでないとすると, どうやって海拔326mまで持ち上げられたのだろうか? 主に3つの可能性が議論された.

第1は, 海水準変動によるというものだ. 主にオアフ島での調査から, 最終間氷期(約12万年前)の海水面は現在よりも8m程高かったと推定されている. これは当時の全世界的な海水準(約6m)よりもやや高い値を示す(Jones, 1993)が, とても326mにはおよばない.

第2は, 人間活動説, すなわちハワイの先住民たちがサンゴを高地まで運んだ, というのだ. ラナイ島では海岸付近の玄武岩台地の上にサンゴが積み上げられている(写真1: 漁師の神社と呼ばれている)例がある. しかし海成礫岩は, モロカイ, ラナイ両島の広域に, 場合によっては数mもの厚さで分布しているので, すべてを人間活動で説明するのは不可能だ.

最後の説は, モロカイ, ラナイ両島が隆起した, というものである. ハワイ諸島で最も新しいハワイ島では, 生成した火山体がプレートに対しての荷重となり, 島が沈んでいる(第3図). 検潮記録の解析

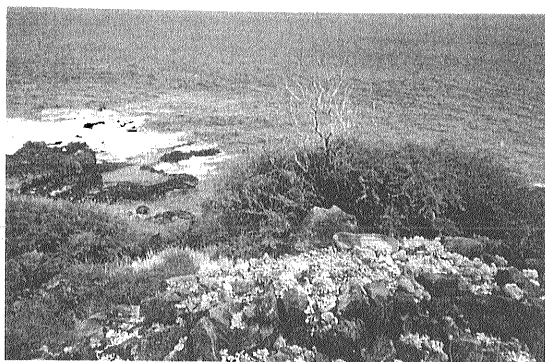
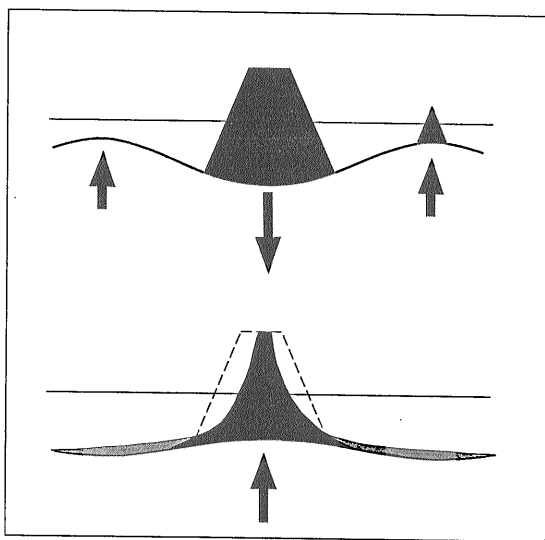


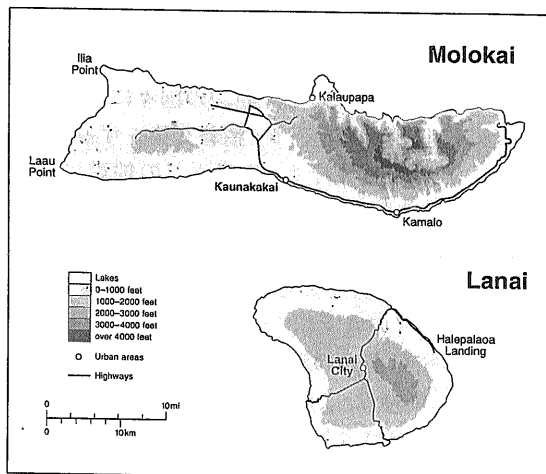
写真1 “漁師の神社”。海岸付近の玄武岩からなるテラスの上に、おそらくハワイの先住民によってサンゴ片が積み上げられている。



第3図 島の隆起のメカニズム。(上)火山活動などで島ができる(中央)と、その荷重でプレートが凹み、その島は沈む。プレートの弾性的な性質のために、周辺部の海底や島は逆に隆起する。(下)中央の島の一部分が地すべりによって失われる(質量が周囲に再配分されると)、荷重が小さくなるため、島が上昇する。

や深海に沈んだサンゴ礁の年代分析から、ハワイ島は過去50万年間、毎年2~3mm程度の割合で沈んでいることが知られている。図に示すように、弾性的なプレートに荷重がかかると、その中心部は沈降するが、周辺部では逆に隆起することが期待される。このメカニズムによってモロカイ、ラナイ両島が隆起したというのだ。

もう1つの隆起のメカニズムとして今回提唱され



第4図 ラナイ島、モロカイ島の地形図。コンター間隔は1,000フィート(約300m)。Moore et al. (1997)による。

たのは、津波を起こしたとされる巨大な地すべりによるものである。地すべりによって島の一部分が取り除かれると、これまで保たれていた平衡がくずれ、島が上昇する(第3図)。簡単な計算によると、島の総体積の数分の1程度が崩れ去れば、残った島が100m程度隆起することも可能らしい。

このような賛否両論の意見を聞いたあと、我々はモロカイ島とラナイ島の巡検へと向かった。

5. モロカイ島

モロカイ島はオアフ島のすぐ東隣にある、淡路島よりやや大きい程度の島である。人口約7,000人のひなびた島で、観光客はほとんど訪れず、信号機さえもない。島は東西約60km、南北約15kmと東西に細長く、東と西に火山がある。島の南側はゆるやかな斜面であるのに対し、北側は急な崖で海に落ち込んでいる(第4図)。

西モロカイ火山は約190万年前に、東モロカイ火山は約175万年前にできた。いずれの火山も、生成直後に北半分が大規模な地すべりによって海底へ沈んだと考えられている(Hazlett and Hyndman, 1996)。島の北側の急な崖は落差が800mにもおよび、海底地すべり跡は遠く200km沖まで続いている。北側が崩れたあとに、カラウパパ(Kalaupapa)という小さな盾状火山が現れ、切り立った崖の下にくっついている。ここへは現在でも細い小道を



写真2 モロカイ島の沢沿いの露頭付近の風景。ここで写真3のような海成礫層が見られる。左側の人物はコックス氏。

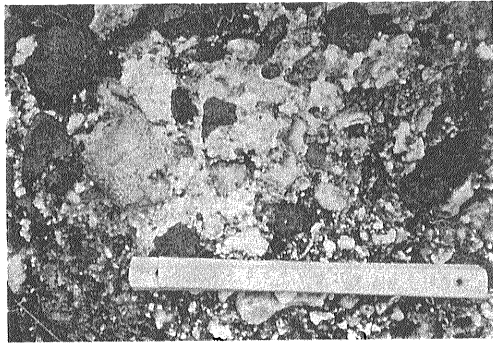


写真3 写真2の露頭付近で見られる海成礫岩。黒い玄武岩質の碎屑物中に白いサンゴや貝殻がはいっている。中央のスケールは約20cm。

歩いて降りるか直接飛行機や船で行くしかない。このような陸の孤島であるため、古くはハンセン氏病(ライ病)の患者が隔離されていたところで、現在も一般人の立ち入りは制限されている。

島の南斜面はゆるやかで、海岸にはサンゴ礁が広がっている(現在は土砂に埋もれてしまったが)。島の人口の中心であるカウナカカイ(Kaunakakai)周辺にサンゴや貝殻を含む海成礫岩が広く分布している。これらは、海岸線から数km以上離れた沢沿いの崖や沢の川床で観察でき、最高地点の海拔は65m程度である(写真2,3)。ワシントン大学のモーア氏(先の米国地質調査所モーア兄弟とは別人)によると、海成の碎屑物の中で、石灰質の礫は陸へ向かって粒度が小さくなるのに対して、玄武岩礫は



写真4 モロカイ島カウナカカイ付近の噴石丘(ほとんど採石されつくしている)。噴石丘を覆うように石灰質の礫層が堆積している。後方、海の向こうにラナイ島が見える。

変化しない。ともに津波によって運ばれたのだが、石灰質礫はその源が海岸にしかないからだという。

カウナカカイの町はずれには噴石丘がある(写真4)。道路工事の材料にするためほとんど採石されつくしているが、ここでは石灰質の礫層が噴石丘を覆っており、さらにダイク状に噴石の中に落ち込んでいるのが観察できる(写真5,6)。モロカイ島における海成礫岩中のサンゴや貝化石の年代測定値は約20万年から35万年前である(第2図)。

海成礫岩が観察されるのはモロカイ島南岸の7kmほどの間に限られる。これは沖合にサンゴ礁がある部分に対応する。1946年アリューシャン地震などによる津波の高さ分布をみると、サンゴ礁海岸では津波は小さい。したがって、サンゴ礁によって保護されていない海岸では、津波は海拔65mよりもさらに高くまではい上がったのであろう。ただしサンゴがないと、津波による堆積物を同定するのは難しい。

6. ラナイ島

ラナイ島はモロカイ島のすぐ南にある小さな島(第4図)で、かつてはパイナップル生産のためドール社によって所有されていた。現在ではパイナップルから観光の島へと移り変わろうとしている。マイクロソフトのビル・ゲイツが新婚旅行のために、島へ渡る飛行機の座席、島中のレンタカーおよびホテルの部屋をすべて買い占めたことで有名になった。



写真5 写真4の噴石丘の断面。噴石丘を覆う石灰質礫層がダイク状に落ち込んでいる。

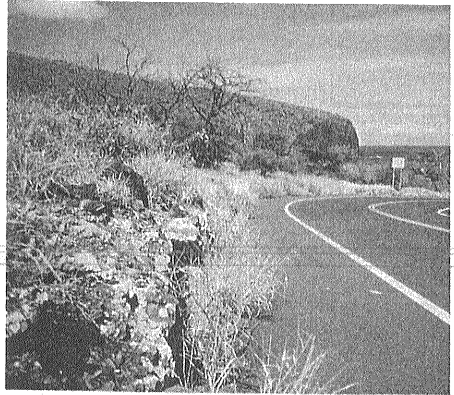


写真7 ラナイ島マネレ海岸付近のプロポエ礫層。道路脇の露頭でサンゴや貝殻を含む海成礫岩が見られる。このような海成礫岩が海拔326mの地点で記載されている。

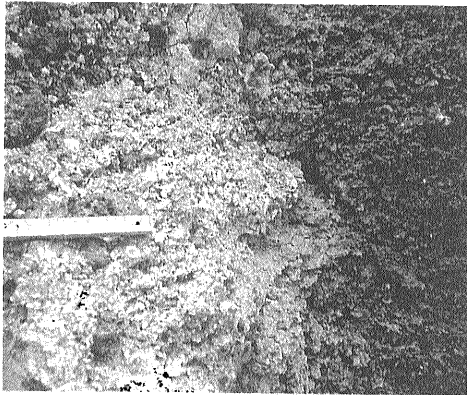


写真6 写真5のダイクの拡大。右側は噴石、左側は落ち込んだ石灰質礫層。

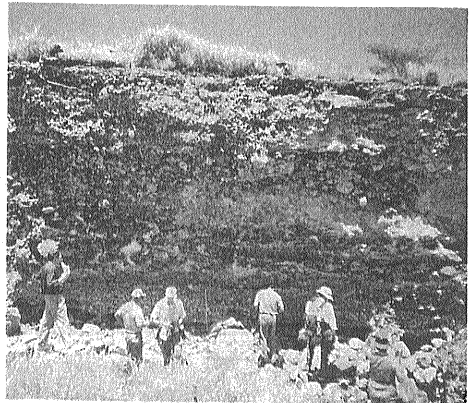


写真8 ラナイ島マネレ海岸付近の露頭。玄武岩からなる海岸付近で、厚さ約5mの石灰質礫層が見られる。

ラナイ島は約130万年前の火山活動でできた島であるが、島の中央低地や南および西海岸の崖の成因については幾つかの説がある。従来は中央低地は山頂カルデラであると考えられていた。新説によると、生成当時のラナイ島は現在の3倍程度の体積があったが、大規模な地すべりによって海底に消えた(Hazlett and Hyndman, 1996)という。

ラナイ島の海拔326m地点でスターンズ氏によって海成礫岩が発見され記載されているが、この露頭は放牧によって破壊されたらしく、現在は残っていない。モア兄弟は、マネレ海岸付近の海拔100m付近までに見られる海成礫岩をフロポエ礫層と名付けた(写真7,8)。その特徴は、主に玄武岩質の碎屑物の中に石灰質礫が含まれること、サ

ンゴや貝化石は砕けた状態で含まれ、成長過程を示さないこと、そして層厚は海岸から離れるに連れて薄くなることである。円磨されていない礫が、層理を作らずに堆積し、淘汰も悪い。これは、海岸で堆積したのではなく、陸上へ大きな営力で運搬され堆積したことを示す。フロポエ礫層に含まれるサンゴの年代は約10～20万年前を示し(第2図)、上部ほど若い。これらの特徴から、フロポエ礫層は数回の津波によって運ばれたとされている。

モア兄弟は当初、津波の発生源はラナイ島南西沖の海底地すべりだと考えていた。その後の陸上および海底の堆積物の年代測定の結果、現在ではハワイ島西側斜面のアリカすべりのステージ2が有力候補だ。

7. コックス氏—“津波”を国際語にした男

この学会および巡検でのもう1つの収穫はコックス(Doak Cox)氏との出会いであった。氏は1917年生まれというから現在80才のはずだが、若々しく、学会での議論でも、炎天下の巡検でも大活躍であった。氏は、ハワイで生まれ育ち、大学院へ進学した1938-46年の間を除いてはずっとハワイで生活してきた。本来は地下水が専門であるが、たまたま大学院を終えて島へ帰ってきた直後に1946年のアリューシャン津波が発生し、その現地調査に出かけたことがきっかけで、津波にも深くかかわることになったらしい。1967年には、名古屋大学名誉教授の飯田汲事氏らとともに太平洋全域の津波カタログを作成した。

コックス氏には以前も1度お会いしたことがあったのだが、今回の学会は人里離れたホテルで開かれたため、毎日食事をともにさせていただいた。そして、過去50年間の、津波も含めたハワイの歴史について、いろいろ興味深いお話を伺うことができた。その会話を通じてわかったのは、“津波”という日本語が国際的に通用するようになったのには彼の貢献が大きいということだ。

Tsunamiという言葉は現在では国際的に使われ、英語の辞書にも載っている。日本では古くから使われてきたが、いつから国際的に使われるようになったのだろうか？ 小泉八雲(Lafcadio Hearn)が1897年に発表した『A Living God』の中で、安政南海地震津波の際の逸話を紹介している。これは後に日本語に訳され『稲むらの火』として有名になったが、この原文ではtsunamiという言葉が使われている。また、日本の地震学の創始者の一人である今村明恒が1930年代に英文の教科書を書いた際にも、tsunamiとして活字にはなっている。しかし、海外ではtidal waveとかseismic sea waveなどと呼ばれていた(海外の報道機関はいまだにtidal waveを使うことが多い)。

ハワイにおいても、1946年アリューシャン津波の現地調査報告(Macdonald et al., 1947)以前の報告書や論文ではtsunamiという単語は使われていない。コックス氏によれば、1946年の調査の際にこの現象を何と呼ぶか、共同研究者のマクドナルド、シェパード両氏と議論になったらしい。津波は潮汐

とは無関係であるから、tidal waveと呼ぶのは正しくない。また津波は、地震波とは異なり、地震による海底地殻変動によって発生するのであるから、seismic sea waveというのもふさわしくない。英語には適当な単語がないので、外国語を使うことになった。シェパード氏は“津波”に対応するフランス語を主張したが、コックス氏が日本語のtsunamiを使うことを強く主張して採用されたい。1946年の津波の報告はその後あちこちで引用され、また、コックス氏自身が津波の分野でも活躍されたので、tsunamiはたちまち広がり、国際的に使われるようになった。1960年にはIUGG(国際測地および地球物理学連合)の中にtsunami小委員会が発足し、少なくとも地球科学者の間ではtsunamiという言葉は国際的に使われている。

8. おわりに

ハワイの津波堆積物について、学会および巡検で見聞きしたことを中心に、自分自身で整理する目的も兼ねてまとめてみた。堆積物や海面変動については全く素人であるから、誤りがあるかも知れない。

さて、モロカイ、ラナイ両島の海成堆積物を自分自身でどう考えるのか、という問に対しての明確な答えは出せずにいる。津波堆積物であることを否定する理由は見当たらなかった。“非常識に大きい”という理由はあるだろうが、ハワイ周辺の海底地すべり跡も、“非常識に大きい”。津波以外で堆積物を海拔326mまで運び上げるメカニズムとしては、地すべりによる荷重損失で島が隆起するというモデルがもっともらしく、さらに定量的な解析が待たれる。

また、今回の巡検で強く感じたのは、津波堆積物の性質がよく知られていない、ということだ。このためには、現世の津波による堆積物の性質をきちんと押さえておくことが重要だ。幸か不幸か、日本は外国に比べると津波に襲われることが多いので、津波堆積物の性質を観察・記載し、国際的に発信していくことが重要であろう。こんなことを再認識した旅であった。

今回の出張は(財)日本産業技術振興協会からの依頼出張であった。学会と巡検に参加する機会を与えた頂いた同財団に感謝します。

引用文献

- Dudley, W.C. and M. Lee (1988) : Tsunami! Univ. Hawaii Press, 132 pp.
- Hazlett, R.W. and D.W. Hyndman (1996) : Roadside Geology of Hawai'i, Mountain Press, 304 pp.
- Jones, A.T. (1993) : Review of the chronology of marine terraces in the Hawaiian archipelago. Quaternary Science Reviews, 12, 811-823.
- Macdonald, G.A., F.P. Shepard and D.C. Cox (1947) : The tsunami of April 1, 1946, in the Hawaiian Islands. Pacific Science, 1, 21-37.
- Moore, J.G. and G.W. Moore (1984) : Deposits from a giant wave on the island of Lanai, Hawaii. Science, 226, 1312- 1315.
- Moore, J.G., W.R. Normark, and R.T. Holcomb (1994) : Giant Hawaiian underwater landslides. Science, 264, 46-47.
- Moore, J.G., W. Bryan, G. Moore, A. Moore, and B. Keating (1997) : Giant wave deposits, Lanai and Molokai, Geological Society of America 93rd Annual Cordilleran Section Meeting, Field Trip Guide.
- Stearns, H.T. (1985) : Geology of the state of Hawaii (2nd ed.). Pacific Books, 335 pp.
-
- SATAKE Kenji (1997) : Tsunami deposits in Hawaii: a report of the 1997 GSA Cordilleran section meeting.
-

<受付：1997年8月1日>