

「かいれい」, 「よこすか」で取得された ハワイ諸島周辺の地形データ

金松 敏也*¹ 樋泉 昌之*² 石井 利枝*²
仲 二郎*³ 高橋 栄一*⁴

日米共同でハワイ諸島周辺の海底調査が1998, 1999, 2001, および2003年に行われた。この調査では潜水調査船, 無人探査機, ドレッジとピストンコアラーを使った試料採取, および海底の水深データ取得を行った。海底地形で特徴的なのは火山体および海底平原に広く分布する海底地滑り地形である。Nuuanu Slideで特徴づけられる岩屑なだれ, Hilina Slumpで特徴づけられるスランプが海底に発達している。Hana Ridge等のリフト海底部には小海丘群が分布している。サイドスキャンイメージでは, 地形図からでは良く分からないNorth Arch Volcanic fieldの溶岩流の分布が明かになった。

キーワード: ハワイ火山, 海底地形図, 音響後方散乱強度, 海底地滑り

Bathymetry of the Hawaiian underwater area, obtained by "KAIREI" and "YOKOSUKA".

Toshiya KANAMATSU*⁵ Masayuki TOIZUMI*⁶ Rie ISHII*⁶
Jiro NAKA*⁷ Eiichi TAKAHASHI*⁸

A series of Japan-USA collaborative survey in the underwater flank of the Hawaiian volcanoes had been carried out in 1998, 1999, 2001, and 2003. This exploration performed the observation of seafloor and collection sample, utilizing manned and unmanned submersibles, dredge and piston-corer, and bathymetric mapping of sea-floor. The resulting of swaths reveals the detail seafloor. A relief of the Hawaiian volcano flank and deep-sea floor is characterized by a wide distributed submarine landslides. Fields of blocky debris (Avalanche), such as Nuuanu Slide, and slower-moving, sediment-blanketed slumps such as Hilina Slump, in contrast, typically develop. The submarine part of a volcano's rift zone such as Hana Ridge shows a rugged morphology in the toe produced by eruptions. Back scattering image clearly shows the lava flow distribution in the relief-less ocean floor, which is difficult to be identified by the bathymetry.

Keywords : Hawaiian Volcano, Bathymetry, Back-scattering, Submarine Land slide

* 1 海洋科学技術センター深海研究部
* 2 海洋科学技術センター情報業務部
* 3 海洋科学技術センター固体地球統合フロンティア研究システム
* 4 東京工業大学
* 5 Deep Sea Research Department JAMSTEC
* 6 Computer and Information Division JAMSTEC
* 7 Institute for Frontier Research on Earth Evolution, JAMSTEC
* 8 Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

1997年, 1999年, 「かいれい」, 「よこすか」にそれぞれマルチナロービームシステム「SeaBeam 2112」が装備されて以来, 深海調査におけるスワスマッピングの重要性は高くなってきた。このシステムは観測点における水深の2倍分のスワデータを1ピングで取得でき, 広域マッピングを可能にした。1998, 1999, 2001, 2002年に「かいこう」・「かいれい」および「しんかい6500」・「よこすか」のシステムによりハワイ諸島周辺の深海調査をおこなった(Naka et al., 2000, Takahashi et al. 2002, など)。この一連の調査において, 大水深部の地形調査をおこない4年間に地形データが蓄積し, おおよそ185,000km²の面積の水深データを取得した(図1)。

ハワイ諸島周辺の海底地形の情報は1980年代までほとんどなかった。地形の状況が明らかになりはじめたのは, 米国がレーガン政権時(1980年代初頭)に国策としておこなったEEZ(排他的経済数域内)のサイドスキャンソナー「GLORIA」による大々的な調査によってであった(Gloom et al., 1997)。サイドスキャンソナーの反射から島の数分の一に達するような大規模な地回り地形が認められ, ハワイ諸島

深海底は, 多くの海底地地回り体が発達する複雑な地形をしていることが明らかになった。今回の一連の調査以前には, 地形データは, スワ幅が狭い初期型のSeabeamシステムによるハワイ島の南部, 東部, 西部のデータ(例えばChadwick, et al., 1993)が, またSimrad EM 300マルチナローシステムによりハワイ諸島周辺の浅海部(島の周辺)に限られたデータが存在していた(Clague et al. 2000など)。他にハイドロスリーブによりNuuanu Slide(Moore et al., 1998), Hilo Ridge(Holcomb et al., 2000)のデータが取得されていたが, 今回のような本海域の広域マッピングは初めてであった。

2. マルチナロービームシステム「SeaBeam 2112」

「Seabeam2112」は, 海底の広域スワスマップおよび音響後方散乱強度(サイドスキャン像)を取得することができる。「Seabeam2112」は12kHzの送波器と受波器からなり, スワ幅は150°~90°に変える事が出来る。このシステムは最大1ピングで151点のデータを取得できる。一方, 音響後方散乱強度の場合は最大1ピングで2000ピクセルのデータを取得できる。船の位置はデフェレンシャルGPSを使って決定す

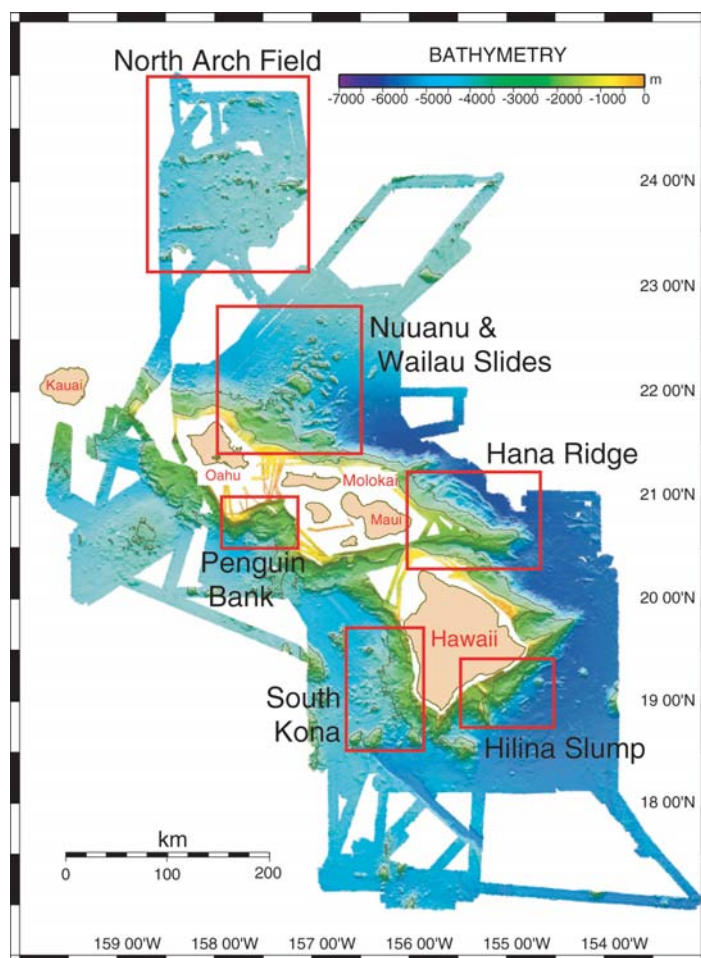


図1 1998, 1999, 2001および2002年に「かいれい」, 「よこすか」によって取得した海底地形データ

Fig. 1 All relief bathymetry recovered by JAMSTEC research vessels 'KAIREI' and 'YOKOSUKA' during 1998, 1999, 2001, and 2002.

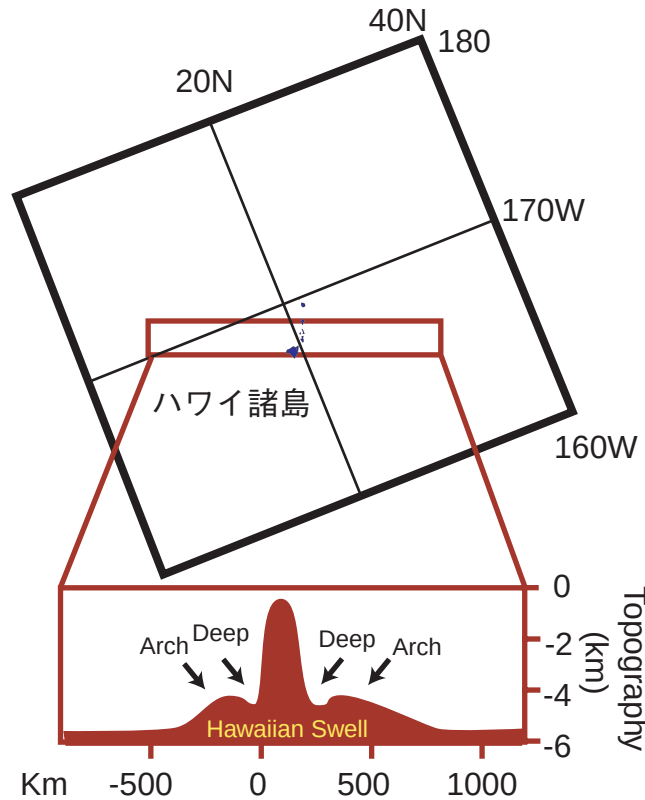


図2 ハワイ諸島周辺地形の大構造
Fig. 2 The cross section of the relief of the Hawaiian Islands

る。広域水深データを取得可能になったのだが、データの確かさは観測点の水深と観測時の船速に大きくよるために(フットプリントの効果: 樋泉ほか, 2001を参照), 詳細な地形を検討する際には, それがどの程度であるか認識していなければならない。また調査地域の水温変化は音波の伝播速度に大きく影響を与える。通常はXBTを使い1800m程度までの音速プロファイルを作成し補正しているが, 「かいこう」, 「しんかい6500」, その他の観測機器により調査海域の水温の測定値を利用できる時はそのデータを利用して音速プロファイルを作成している。「Seabeam2112」は海洋センターの曳航式「かいこう」ランチャーや「ディープトロー」または東京大学海洋研究所が保有する「わだつみ」が取得するデータと比べると分解能は劣るが, 未調査海底の広域調査においては十分海底の底質を知る手だてとなる。ハワイ諸島周辺においては「Seabeam2112」の後方散乱強度像から貴重な情報を得たので後に紹介したい。

3. ハワイ諸島周辺の海底地形の特徴

3.1. 海底地形の大構造

ハワイ火山周辺では火山島の山頂の標高が最も高い, また最深部は, 深海底にある火山の山麓にあり(水深: ~5700m), Hawaiian Deepと呼ばれている。その比高は陸上部, 海底部を合わせると最大9000mに達する。Hawaiian Deepは海洋プレート上に形成された火山体の容量が大きく, そのため火山体の自重でプレートが沈降し, 火山体の

両脇に地溝を形成しているためと考えられている(図2: Wessel, 1993を改変) ハワイ島のヒロでは海水準の上昇4mm/年が観測されているが, 世界平均では~1.5mm/年であり, ハワイ島における大きな沈降量は山体の自重によるものと考えられている(Moore, 1987)。一方, Hawaiian Deepから海側に離れると徐々に地形が高まり, 100Kmほど離れた場所でHawaiian Deepより200mほど比高が大きいHawaiian Archと呼ばれる隆起帯がある。これはハワイ諸島を囲むように発達しており, その成因はマントル上昇流によっていると考えられた(Wilson, 1963)。または下部地殻の再加熱と熱膨張によるものだと考えられた(Detrick and Crough, 1978など)。しかし, この地域にはこれに見合う熱流量はなく(VonHerzen et al., 1989)メカニカルに隆起しているためと考えられている(Olson, 1990)。このうちのアアフ島北方海域のNorth Arch Volcanic Field(後述)には薄い溶岩流が大量に噴出しており, ハワイ諸島本体がソレライトで特徴づけられるのに対して, アルカリ質な溶岩で特徴づけられる(Clague et al., 1990など)。一般に深海底の地形には海洋底が中央海嶺で生成された時のホルスト・グラベン構造, およびフラクチャーゾーンのようなトランスフォーム断層と呼ばれる基本構造が認められる。しかしこれらは, ハワイ諸島の近辺では殲滅して見えない。これはハワイ火山を起源とした地送り等により火山砕屑物が海洋底に運搬され(Naka et al., 2002など), 構造が埋められているためであろう。

3. 2. ハワイ諸島海底下の地形

図1に,「よこすか」,「かいいい」によって取得されたハワイ諸島周辺の海底地形図を示す。各地域の拡大図を図4から図10に示す。「SeaBeam 2112」で取得した地形データはグ

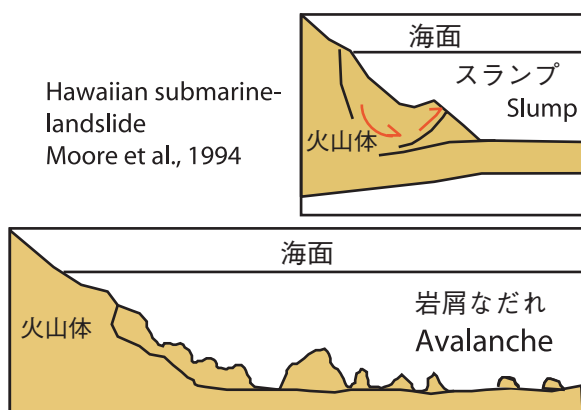


図3 ハワイ海底地すべりの型：岩屑なだれ型とスランプ型
Fig. 3 The cross section of Debris Avalanche and Slump

リッド化しWessel and Smith, 1995のGMTを使用して図化している。ハワイ火山の海底側面部は陸上に比べ急な傾斜を呈している。この急峻な側面にはハワイ海底地形の特徴の一つである様々な形態の地滑り地形が認められる。海底地滑りには大きく2つのタイプがあり岩屑なだれ型とスランプ型が認められる(Moore, 1994など図3)。

3. 2. 1. 岩屑なだれ(Debris Avalanche)

岩屑なだれ型でもっとも顕著な構造はオアフ島北方2-300kmにまで広がるNuuuanu SlideとWailau Slideである(図4)。Nuuuanu Slideはオアフ島から派生しており, Wailau Slideはモロカイ島から派生している。それぞれの地すべり体はその延長で衝突している。Nuuuanu Slideは世界最大規模の海底地送りと考えられており, これはTuscaloosa海山という巨大な地送りブロックを含む。このTuscaloosa海山は比高3km, 横幅2km, 縦幅1km程度にもなり, その容積は富士山より大きい。この地送りが瞬間的に起こったならば非常に大きな津波を起こすと考えられている。太平洋の中心で発生した津波は10時間後, アメリカ西海岸や日本を含む環太平洋地域を一気に飲み込んだ可能性がある(Satake et al.,

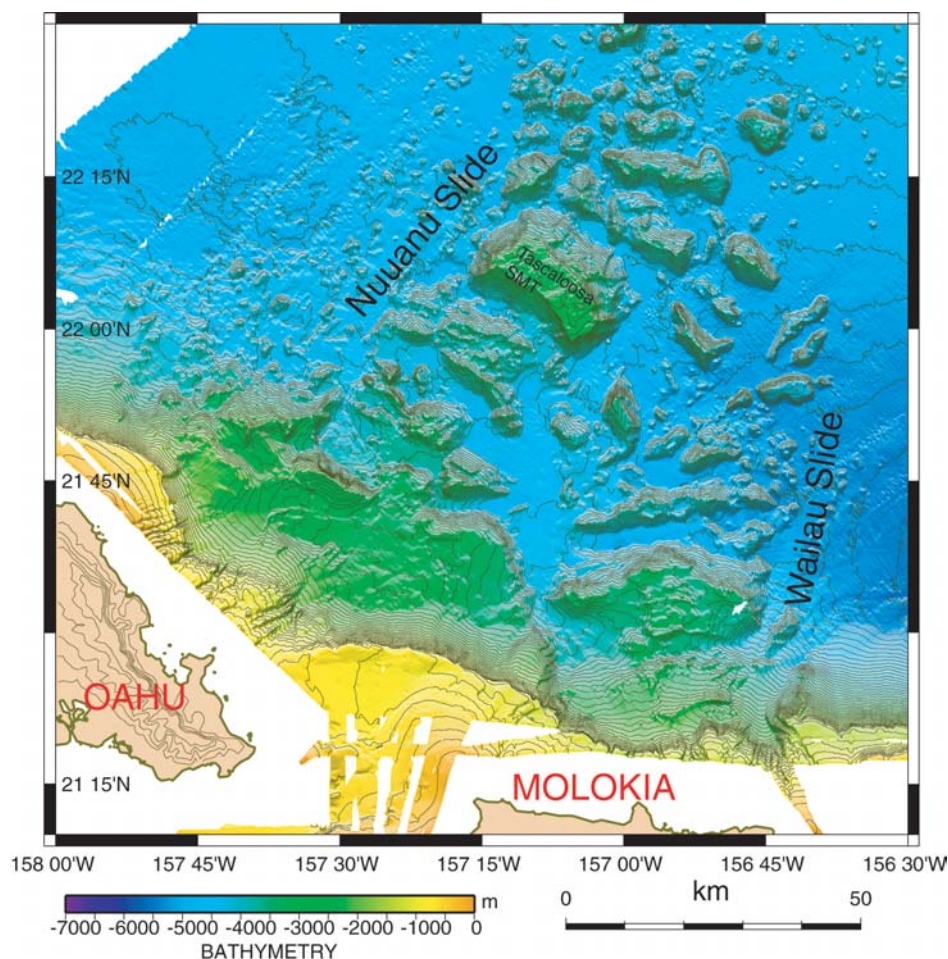


図4 オアフ島北方から派生するNuuuanu 地すべりと モロカイ島北方から派生するWailau地すべり。
Fig. 4 The Nuuuanu and Wailau debris avalanches derived from Koolau, Oahu Island and East Molokai volcanoes respectively.

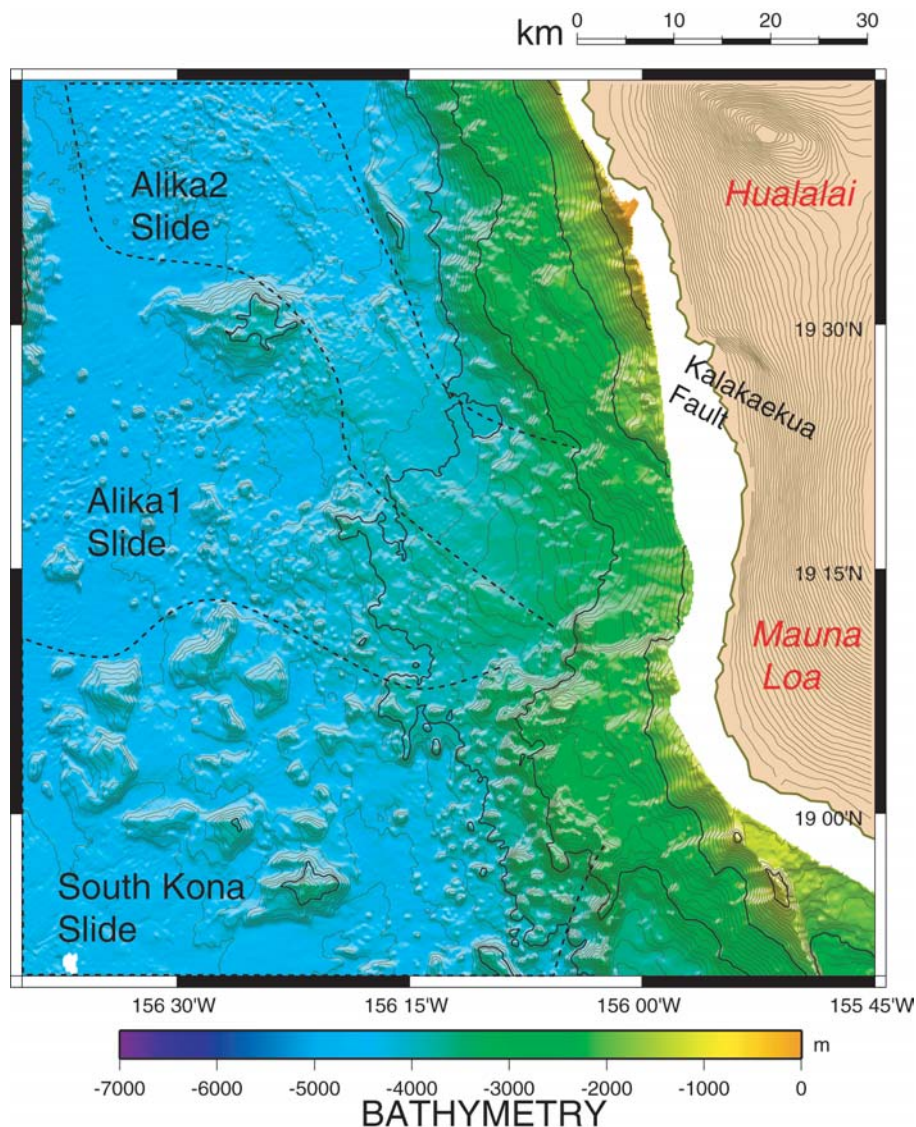


図5 ハワイ島西方海域の海底地形図

Fig. 5 Bathymetry of the western area of the Hawaii Island.

2002)。この地這りの時期は明らかでないが、火山成長史の中で比較的後期に起こっているという考え方がある (Kanamatsu, et al., 2001)。岩屑なだれ型の中でよく研究されている他の地域としてはハワイ島西方を上げることができ (図5)。ハワイ島西方海域には複数の地這り体が発達しており、この中で規模が大きい物としてSouth Kona Slideがある。これは数kmの散乱した地這りブロックを含み、ハワイ島のどのスロープから発生しているのか地形からでは良く分からない。さらに白亜紀に生成されたと考えられている海山がその識別を難しくしている。

3. 2. 2. スランプ (slump)

スランプ型地這り構造の典型としてハワイ島南東に発達するHilina Slumpを挙げることが出来る (図6)。これは現在火山活動が活発なキラウエア火山の南方に位置しており現在もスランピングが進行している、1975年11月にハワイ島南

東で起こったM7.2の地震の際にハワイ島南東の海岸は垂直方向に最大で3m、水平方向に10m移動し海岸が沈降した (Lipman, et al., 1985)。このHilina Slumpの活動は、キラウエア火山等のリフトゾーンにマグマが貫入し、地塊が海側に押し出されるためと考えられている (Tilling and Dvorak, 1993など)。このヒリナスランプは水深3000m付近に比較的、平坦な地形を持ちMid-slope basinと呼ばれている。この前縁にはouter benchと呼ばれる高まりがあり、これを越えると急峻なスロープが深海平原まで続く。Mid-slope basinには、キラウエア火山等から流れ出た溶岩流が海水と接し、火山碎屑物が生成され、これが供給されていると考えられている。ヒリナスランプの東方には、後背に陸地を持たないPuna Ridgeがあるが、このスロープには小海丘群が多数認められる。一方、歴史時代の溶岩流が後背にあるヒリナスランプのスロープは比較的平坦な地形を示す。この地形のコントラストは火山碎屑物の被覆があるかどうかを示唆して

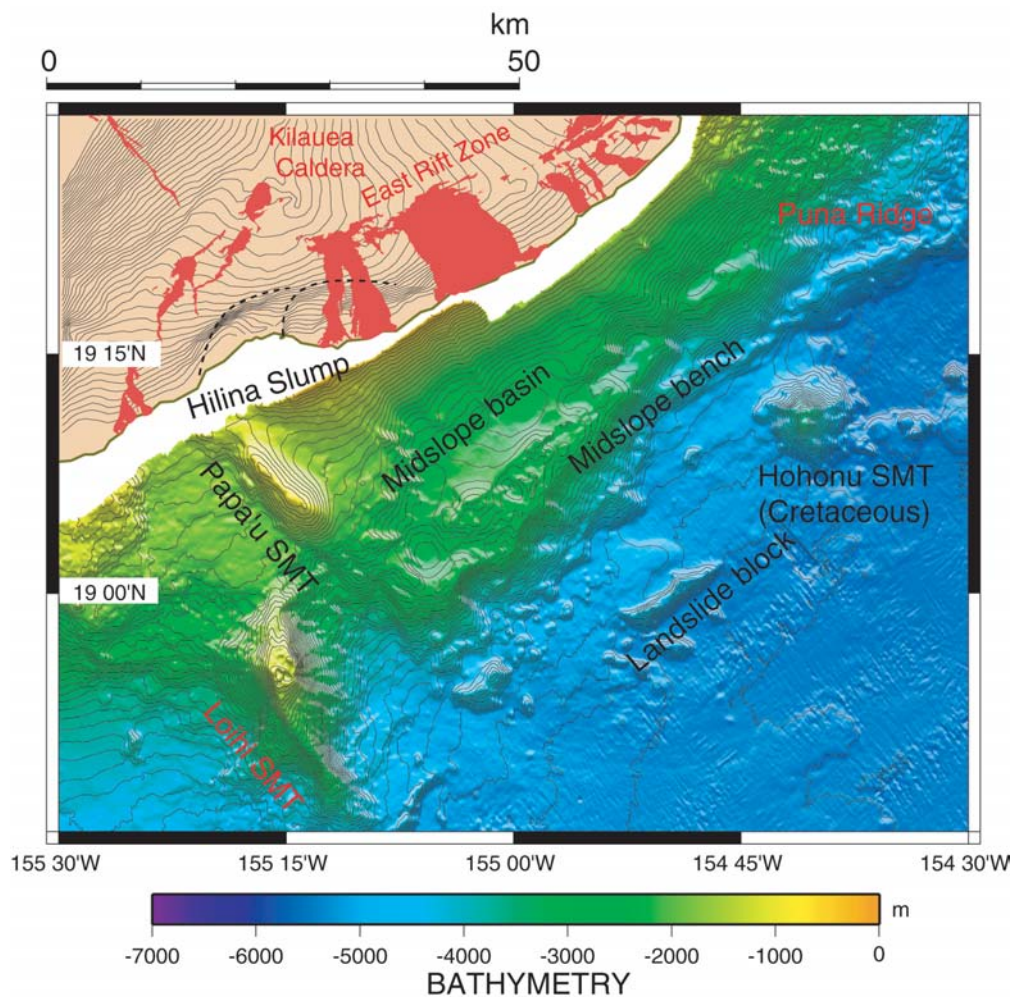


図6 ハワイ島南方キラウエア火山の裾に発達するHilina Slump. この地すべりは現在も活動中である。
Fig. 6 Bathymetry of active Hilina Slump, in the south flank of Kilauea, Hawaii Island

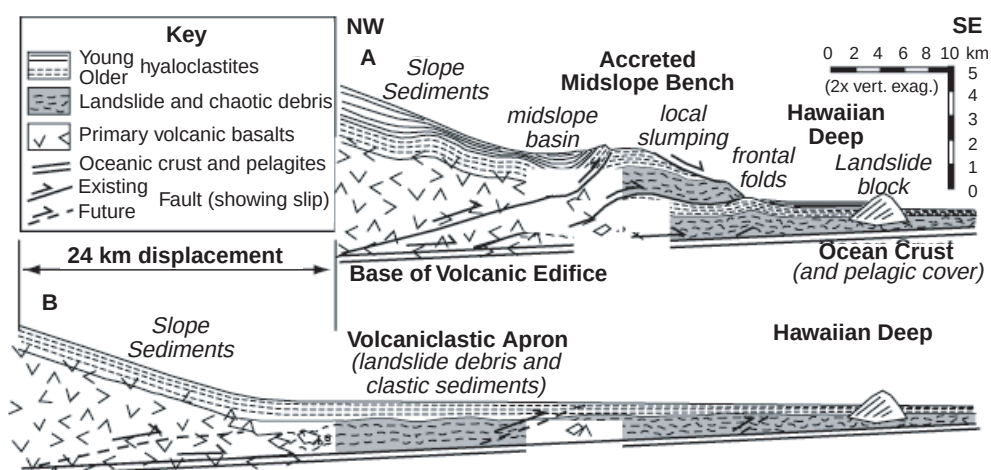


図7 Morgan et al., 2000によるHilina Slump音響断面とその解釈(OK)
Fig. 7 Model of Hilina Slump along Kilauea's submarine south flank. Showing overthrusting and accretion of the submarine sediments (Morgan et al., 2000)

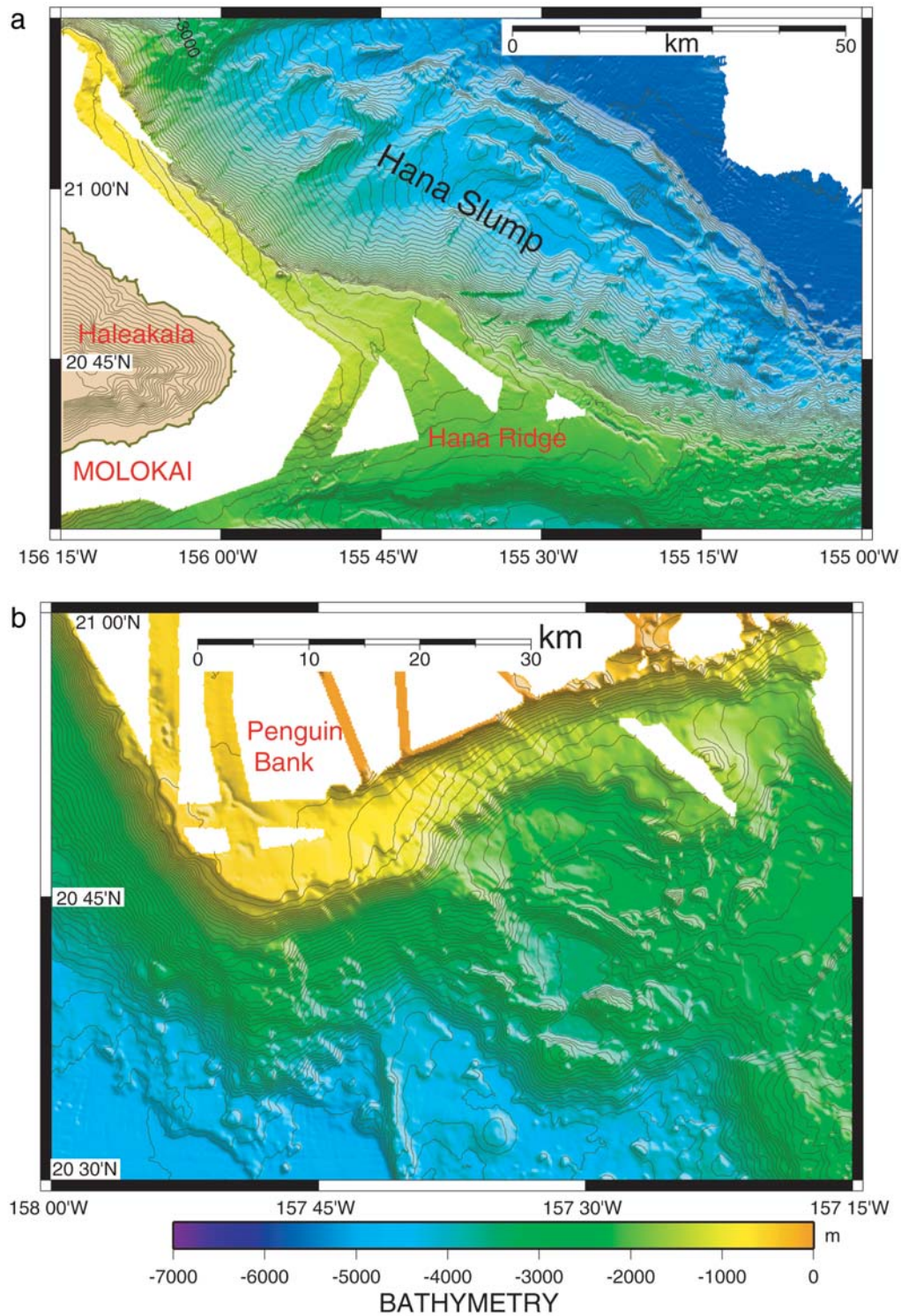


図8 a: マウイ島北東のHana Slump, b: モロカイ島南西のPenguin Bank南部に発達する二重スランプ構造。
Fig. 8 a, Hana Slump, northeast of Maui Island, b multi-slump structure in south of the Penguin Bank, Molokai Island.

いる。Mid-slope basinには多くの火山碎屑物が供給されているはずだが、この中央は大きく窪んだ地形を示し、完全に埋積されていない。この事は堆積物の埋積より、Mid-slope basinの沈降が大きく進行している事を示しているだろう。一方、lower slopeには古い地層が露出していると考え

られている。これは地震波による音響断面構造はあたかも付加体のようであり、深部の地層がスラストによりせり出しているためと考えられている (Moragn et al., 2000: 図7)。Hilina Slumpは、ハワイ諸島で最も活発な地送りであるため、地送りのメカニズムを知る最高の研究地域であり、参

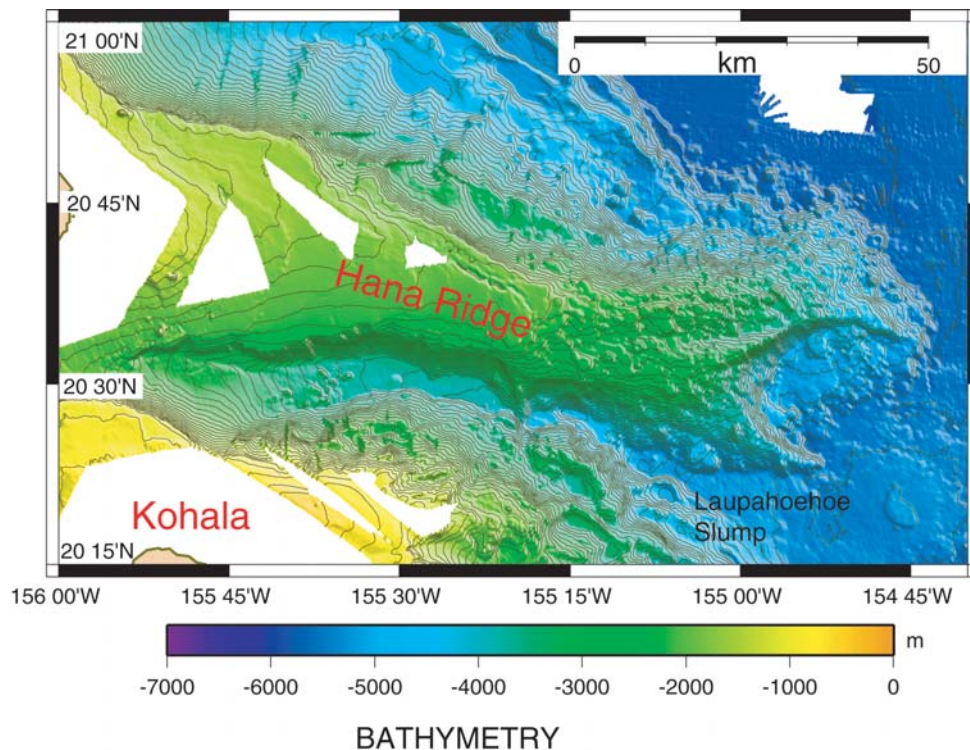


図9 ハナリッジの海底地形図

Fig. 9 Bathymetry of Hana Ridge in the east of Molokai Island.

加研究者の間でも激しい議論が続けられている。

このヒリナスランプが高速で崩壊した場合、Nuuanu Slide 同様、巨大な津波を引き起こすと考えられている。Ward (2002) の試算によれば10m程度の津波が南米、ニュージーランドに押し寄せる可能性がある。このHilina Slumpに類似した構造が、ハワイ諸島の他の火山体側部に見られる。Hilina Slumpと異なる点はスロープに発達するbasinが階段状に複数見られる事である。その例としてハワイ島北方のKohala火山の北方 (Smith, 2002) が挙げられる。Hilina Slump同様に平坦なスロープは堆積物で埋め尽くされていない。他にHana Ridgeの北方 (図8a), モロカイ島から続くPenguin Bankの南方 (図8b) にも見られる。

3. 2. 3. リフト海底部 (Submarine rift)

Puna Ridge, Hilo Ridge, Hana Ridgeと呼ばれるリフト海底部は陸上火山に比べて比較的初期の火山情報を持っていると考えられている (Clague et al., 1995など)。陸上のリフトゾーンは山頂カルデラから多くの場合2方向に延びており、(キラウエアの場合は東と南西) それらが海底部まで連続している。リフト海底部の側面は急峻な斜面からなり、その表層にいくつかの溶岩噴出の形態が認められる。Coneと呼ばれる比高百m程度の円頂丘や、Terraceと呼ばれる平坦な頂の比高数百メートルの丘、Pillow ridgeと呼ばれる数百m～数kmの長さで、数十mの比高の隆起部が認められる (Smith, et al 2002など: 図9)。これらの微細地形はマグマ噴出時の物理条件を示唆しており、海底のリフト形成を

知る上で重要な情報である。マウイ島のHaleakala火山から東にのびるHana Ridgeはハワイ諸島で最も長大な海底リフトである。Hana Ridgeの特徴はハワイ島キラウエアリフトゾーンからつながるPuna Ridge等と違い先端で枝分かれするやや複雑な“Y”字状構造を示している (Smith et al., 2002)。先端部に見られる半円形の地形はリフトの分岐によって形成されたものなのか、あるいは巨大な地送りによって崩壊した痕跡なのか、今のところ統一した見解は得られていない。

3. 2. 4. アーチ火山地域 (Arch volcanic field)

ハワイ諸島から離れた海域にNorth ArchおよびSouth Arch と呼ばれる火山平原がある (Clague et al., 1990, Lipman, et al., 1989など)。このアーチ火山地域の噴出物は、マントルプリュームの縁辺部の情報を含んでいると考えられている。North Arch fieldはオアフ島から北方100から390kmの深海底におよそ2400km²という広大な面積を持ち、深海底では拡大系を除けば世界最大規模である (図10)。この溶岩流は非常に小さな傾斜の深海底を薄く広く分布している (Clague et al., 2000dなど)。ここで後方散乱強度イメージの例を紹介したい。後方散乱強度は海底で散乱し、戻ってきた音波を受信するが。海底面が堅い岩盤の場合は音波が強く、柔らかい堆積物の場合は音波が弱い。図はこの音波の強弱を濃淡表示したものである。従って柔らかい堆積物と、固い溶岩、海山やシートフローの分布がこれによって分かる。この後方散乱強度イメージが威力を発揮したのはNorth Arch volcanic fieldにおける非常に薄い溶岩流で覆わ

SideScan Image

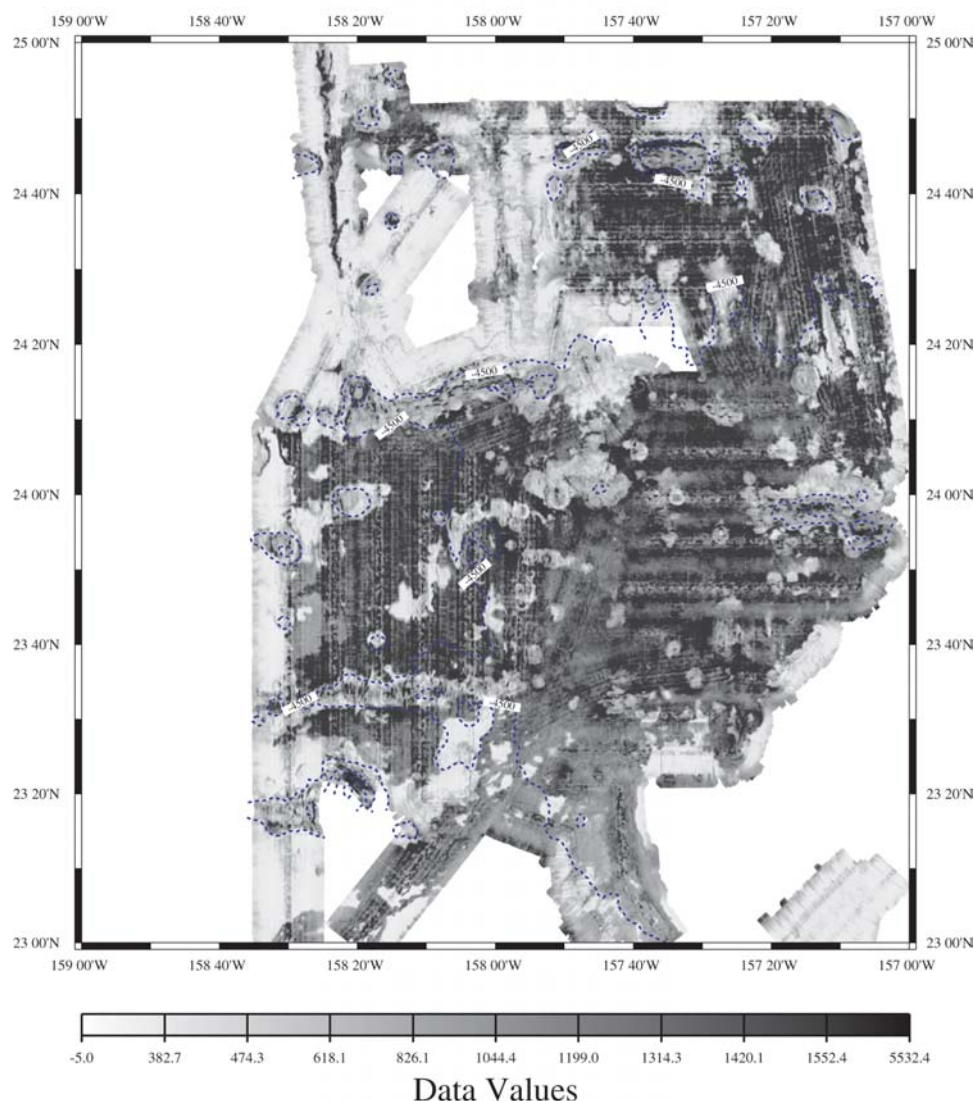


図10 North Arch Volcanic Fieldにおける後方散乱強度のイメージ。後方散乱強度が強いほど黒色に近い色で表される。

Fig.10 Backscatter image of North Arch Volcanic Field with higher acoustic reflectivity as darker gray tone.

れる海洋底においてであった。ここでは溶岩流が薄いため、地形の情報からでは溶岩流の分布が明瞭でない。特に2001年の「かいこう」・「かいいい」を使った調査では潜航調査点を決定する際に大きな情報源になった。

4. まとめ

ハワイ周辺の海底部の地形調査を行った結果、ほとんどの火山海底部側面に海底地じりが認められ、火山体の崩壊はハワイ火山の普遍的な現象である事が分かった。これにはHilina Slumpで代表される火山側面に発達するスランプ型と、Nuuanu Slideで代表される、深海平原に広く分布する岩屑なだれ型がある。スランプ型は現在、火山活動が活発なキラウエアを含むリフトゾーンの活動に関連あると考え

られている。一方岩屑なだれ型は規模が大きく、崩壊の時期は明らかでないが、火山成長史の中で比較的后期に起こったかもしれない。また島の延長にあるリフト海底部には、比較的初期の火山構造が認められ火山噴出の微細地形が発達している。アーチ火山地域と呼ばれる、火山島から離れた海域には薄く広大な溶岩流が分布している。これは後方散乱強度のイメージからその分布を良く読み取ることが出来る。

火山側面の地形情報はハワイ火山成長史モデルを考える上で最も基本的な情報である。海底地形の広域調査の結果、新たな海底地じりの分布や、溶岩噴出の場所が明らかになった。海底地形が示す発達史は、以前考えられていたものより複雑で、研究者は地形データを基にハワイ火山成

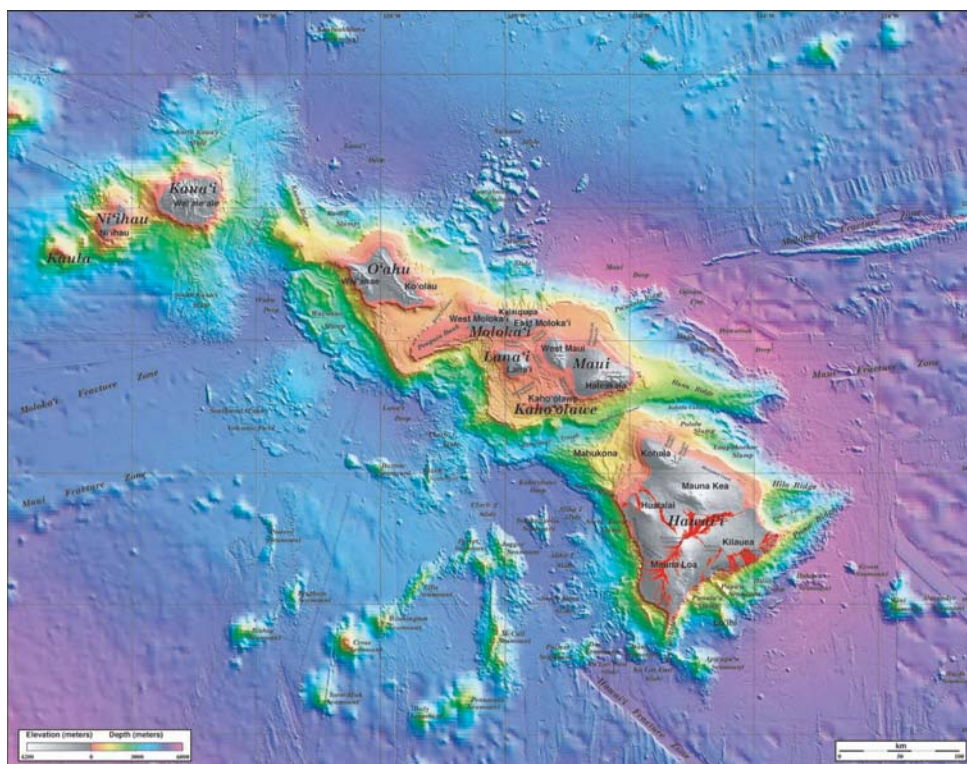


図11 Eikins et al, 2003による海底地形図

Fig.11 "Hawaii's Volcanoes Revealed"prepared by Eakins et al., 2003"

長史モデルを再構築しようと奮闘している。本稿においては地形の紹介にとどまったが、本調査による研究成果が徐々に発表されている。ホットスポット火山で最も情報量が多いハワイ諸島で火山発達史の理解が進む事は重要である。それは本調査で得た知見は、ハワイ諸島のみならず、他の海域のホットスポット型海山にも適応可能と考えられるからである。

今回のハワイ諸島周辺海域調査において地形データの重要性が認識され、海洋科学技術センターの船舶により取得した地形データと米国の既存の地形データを合わせて一体の地形図を完成させる努力が行われた(図11: Eakins et al., 2003)。これはハワイ火山成長史を理解するための一助になるであろう。

謝辞

ハワイ諸島周辺海域調査にあたり、お世話になった「かいれい」、「よこすか」船長ならびに乗組員の方々、「しんかい6500」司令ならびに運航チームの方々、「かいこう」操縦班班長ならびに操縦班の方々、また調査を支援して下さいました多くの方々にお礼申し上げます。

参考文献

- Clague, D.A., J.G. Moore, and J.R. Reynolds, Formation of submarine flat-topped volcanic cones In Hawaii, *Bull. Volcanol.*, 62, 214-233, 2000.
- Detrick, R. S., and S. T. Crough, Island subsidence, hot spots,

and lithospheric thinning, *J.Geophys. Res.*, 83, 1236-1244, 1978.

Clague, D. A., R. T. Holcomb, J. M. Sinton, R. S. Ditrick, M. E. Torrensan, Pliocene and Pleistocene alkalic flood basalts on the seafloor north of the Hawaiian islands, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 98, 175-191, 1990.

Clague, D. A., J. G. Moore, J. E. Dixon, and W. B. Friesen, Petrology of submarine lavas from Kilauea's Puna ridge, Hawaii, *Jour. Petrol.*, 36, 299-349, 1995.

Eakins, B. W., Robinson J. E., Kanamatsu, T., Naka, J., Smith, J. R., Takahashi, E., Clague, D. A., Hawaii's Volcanoes Revealed, U.S. Geological Survey Geologic Investigations Series I-2809 (<http://geopubs.wr.usgs.gov/i-map/i2809>), 2003.

Groome, M.G., C.E. Gutmacher, and A.J. Stevenson, Atlas of GLORIA sidescan-sonar imagery of the Exclusive Economic Zone of the United States: EEZ-View, U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.97-540, 1997.

Holcomb RT, Holmes M, Denlinger RP, Searle RC & Normark WR, Submarine Hawaiian north arch volcanic field. *EOS* 69: p. 1445, 1988

Holcomb, R.T., B.K. Nelson, P.W. Reiners, and N.-L. Sawyer, Overlapping volcanoes: the origin of Hilo Ridge, Hawaii, *Geology*, 28, 547-550, 2000.

Kanamatsu, T., Herrero-Bervera, E., and McMurtry, M., Magnetostratigraphy of deep-sea sediments from piston

- cores adjacent to the Hawaiian Islands: Implication for ages of turbidites derived from submarine landslides, In AGU monograph, The Evolution of Hawaiian Volcanoes, Recent Progress in Deep Underwater Research, Takahashi et al., ed, 51-64, 2001.
- Lipman, P. W., Lockwood, J. P., Okamura, R. T., Swanson, D. A., and Yamashita, K. M., Ground Deformation Associated With The 1975 Magnitude-7.2 Earthquake And Resulting Changes In Activity Of Kilauea Volcano 1975-1977, Hawaii: U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., v. 1276, p. 1-45, 1985
- Lipman, P. W., D. A. Clague, J. G. Moore, and R. T. Holcomb. South arch volcanic field - Newly identified young lava flows on the sea floor south of the Hawaiian ridge, *Geology*, 17, 611-614, 1989.
- Moore, J. G., W. R. Normark. And R. T. Holcomb, Giant Hawaiian underwater landslides, *Science*, 264, 46-47, 1994.
- Moore JG, Subsidence of the Hawaiian ridge. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1350: pp. 85-100, 1987
- Moore, J.G., and W.W.J. Chadwick, Offshore geology of Mauna Loa and adjacent areas, Hawaii, in *Am. Geophys. Union Monogr.* 92, edited by J.M. Rhodes, and J.P. Lockwood, pp. 21-44, American Geophysical Union, Washington, DC, 1995.
- Morgan, J. K., G. F. Moore, D. J. Hills, and S. Leslie, Overthrusting and sediment accretion along Kilauea mobile south flank, Hawaii, Evidence from volcanic spreading from marine seismic reflection data, *Geology*, 28, 667-670, 2000.
- Naka, J., and others, Tectono-magmatic processes investigated at deep-water flanks of Hawaiian volcanoes: *Eos Transactions American Geophysical Union*, v. 81, p. 221,226- 227, 2000.
- Naka, J., Kanamatsu, T., Lipman, P., Sisson, T., Tsuboyama, N., Morgan, J., Smith, J., and Ui, T., Deep-sea Volcaniclastic Sedimentation Around the Southern Flank of Hawaii, In AGU monograph, The Evolution of Hawaiian Volcanoes, Recent Progress in Deep Underwater Research, Takahashi et al., ed, 29-50, 2001.
- Olson, P., Hot spots, swells and mantle plumes, in *Magma Transport and Storage*, edited by M. P. Ryan, pp. 33-51, John Wiley, New York, 1990.
- Satake, K., Smith, J.R., and Shinozuka, K., Three-Dimensional reconstruction and Tsunami Model of the Nuuanu and Wailau Giant Landslides, Hawaii, In AGU monograph, The Evolution of Hawaiian Volcanoes, Recent Progress in Deep Underwater Research, Takahashi et al., ed, 333-346, 2001.
- Takahashi E., Lipman P., Garcia M., Naka J. and Aramaki, S., 2001, Hawaiian Volcanoes, Deep underwater perspectives Hawaiian Volcanoes, AGU Monograph Vol.128
- Tilling, R. I., and J. J. Dvorak., Anatomy of a basaltic volcano, *nature*, 363, 125-133, 1993.
- 樋泉昌之, 小寺透, 石井利枝, 細谷慎一, 門馬大和, 日本海溝三陸海底崖マネキンサイトで取得された SeaBeam データに関する一考察, 第18 回しんかいシンポジウム 講演要旨, P12, 2001
- Von Herzen, R. P., M. J. Cordery, R. S. Detrick, and C. Fang, Heat flow and the thermal origin of hot spot swells: The Hawaiian swell revisited, *J. Geophys. Res.*, 94, 13,783-13,799, 1989.
- Wessel, P., Observational Constraints on Models of the Hawaiian Hot Spot Swell, *J. Geophys. Res.*, 98, 16,095-16,104, 1993
- Wessel, P., and W.H.F. Smith, New version of the Generic Mapping Tools released, *Eos Trans. AGU*, 76, 329, 1995.
- Wilson, J. T., A possible origin of the Hawaiian islands, *Can. J. Phys.*, 41, 863-870, 1963.

(原稿受理：平成16年1月5日)