日本列島周辺の海底地質 その 2. 琉球弧と沖縄舟状海盆 (トラフ)*

岩淵義郎†

Submarine Geology around the Japanese Islands Part 2. The Ryukyu Arc and the Okinawa Trough

Yoshio Iwabuchi‡

Abstract

The main part of the Ryukyu Arc consists of the Nansei Syoto (Ryukyu) Trench, the Nansei Syoto Ridge and the Okinawa Trough from east to west. The Nansei Syoto Ridge forms a geanticline of the Ryukyu Arc, and the basement of the Nansei Syoto Ridge consists of Paleozoic rocks and the Shimanto Super-group distributed widely in Southwest Japan. Volcanic activities of green tuff developed in the Eocene and Miocene, and they destroyed the framework of the pre-Tertiary structure. After the middle to late Miocene regression in the Nansei Syoto area, widely spread transgression in the late Miocene to early Pleistocene caused deposits of the Shimajiri Group, consisting mainly of sand, mud and pyroclastics. The sedimentary basin of the Shimajiri Group spread over the Nansei Syoto area, including the Okinawa Trough region. Judging from the sedimentary pattern, the construction of the present Ryukyu Arc started during the sedimentation of the Shimajiri Group in the Pliocene. Uplift of the Nansei Syoto Ridge and subsidence of the Okinawa Trough continued in response to the development of the Nansei Syoto Trench. The volcanic activities on the Nansei Syoto Ridge took place in the Pliocene to early Pleistocene and the middle Pleistocene to Holocene. The Okinawa Trough in the Quaternary is active in tectonics. Step faults form the graben structure in the axis of the southwest Okinawa Trough. Some grabens have mid-knolls of basaltic to rhyolitic rocks. Recent hydrothermally active spots with sulfide chimneys and ores can be observed in the central part of the trough northwest of Iheya Sima.

1. 緒言

1968 年, ハント号 (アメリカ) は, 黄海～東シナ海で予察的な地質構造調査を行い, 堆積盆の分布などをはじめて明らかにした (Emery *et al.*, 1969). 南西諸島周辺海域の

調査については, 1975 年の地質調査所の広域調査, 1973～76 年, 1984～87 年の海上保安庁水路部の詳細な大陸棚の組織的調査 (地形, 地質構造, 地磁気, 重力等) があり, また同部が現在も展開中の沿岸の海の基本図測量などにより, 次第に沖縄舟状海盆をはじめとする琉球弧の詳細な海底地形・地質構造が明らかになってきた。沖縄舟状海盆は典型的な背弧海盆で, 海盆底は現在も拡大しつつあるといわれた。この検証のために, 1984 年にはリソスフェア探査開発計画 (DELP) の調査 (地震探査, 地磁気, 地殻熱流量等) も行われた。1988 年には, ゾンネ号 (ドイツ) による伊平屋島北西の沖縄舟状海盆中軸部での

* 1994 年 5 月 13 日受領 ; 1994 年 7 月 25 日受理

† 日本水路協会; 〒104 東京都中央区築地 5 丁目 3-1 海上保安庁水路部内

‡ Japan Hydrographic Association, c/o Hydrographic Department, Maritime Safety Agency, 3-1, Tsukiji 5-chome, Chuo-ku, Tokyo, 104, Japan

Fig. 1. Bathymetric chart of the Ryukyu Arc. 200m-interval contours from the commemorative chart of the southern seas of Nippon (Hydrographic Department of Japan, 1991). Seismic profile sections 1 to 5 and A-B are shown in Figs. 9 and 10.

熱水鉱床の発見があった。その後、潜水調査船「しんかい」による精力的な調査が加わり、沖縄舟状海盆の中部からは海底熱水活動に伴う熱水の噴き出し、チムニー、熱水鉱床などの発見が相続いた。本文は水路部の組織的調査の結果を中心に、その他の資料を加えて取りまとめたものである。

2. 海底地形

琉球弧の海底地形の概要を Fig. 1 に示す。Fig. 2 は後述する地質構造を念頭に入れた分類図である。本海域の骨格となる地形は、大隅群島から先島群島に至る島々を頂く南西諸島海嶺を中心にして、その東側は南西諸島(琉球)海溝に、西側は沖縄舟状海盆を経て東シナ海の陸棚となる。現世の火山活動で特徴づけられる火山フロントの位置は、南西諸島海嶺の北部では海嶺頂部とほぼ一致するが、中部では同海嶺の西縁に位置し、更に南部では沖縄舟状海盆内の東縁へと、海嶺の頂部からはどんどん西にずれていく(岩淵, 1989)。南西諸島海嶺から海溝に至る大陸斜面には深海平坦面が発達する。また、多く

Fig. 2. Geostructure of the Ryukyu Arc.

1. 200m-depth contour, 2. 1000m-depth contour, 3. geanticline of the Nansei Syoto Ridge, 4. trench axis basins, 5. faults, 6. grabens and mid-hills, 7. extent of abundant minor faults, 8. basins and troughs on the Nansei Syoto Ridge, 9. knolls and seamounts, 10. Paleozoic rocks, 11. Tertiary intrusive rocks(p: Paleogene), 12. green-tuff of the Miocene, 13. volcanics of the Pliocene to early Pleistocene, 14. late Pleistocene to Recent volcanoes, 15. late Pleistocene to Recent volcanoes estimated from magnetic anomaly and topography, 16. basement high at the margin of the East China shelf, 17. gravity-low of deep-sea terrace and trench axis. a. Yonakuni Submarine Graben, b. Yaeyama Submarine Graben, c. Miyako Submarine Graben, d. Miyako Seamount, e. Izena Hole, f. Iheya Knolls.

の海底谷が斜面を開析している。海底谷の末端は深海平坦面に達する。深海平坦面は東北日本太平洋側ものに比べればはるかに起伏に富むものである。南西諸島海溝は、北は九州・パラオ海嶺に限られ、南は台湾の東方沖にま

Fig. 3. Schematic structure section across the northern Ryukyu Arc (Ludwig *et al.*, 1973).

で続く。この間の距離は1350kmである。最深部は沖縄島南方の水深7460mである。海溝の北部では、奄美海台と大東海嶺の西端部が海溝軸を跨ぐように分布することから、海溝軸は連続性を欠き、海溝特有の幅狭い溝地形を失っている。

沖縄舟状海盆の水深は、北部の男女海盆の600～800mから、南部の2000m以深へと深くなる。また、北部では平坦な海底の各所に島、海丘などの浅所がある。これらの浅所の方向性は、舟状海盆の一般的方向である北東～南西をとる。沖縄舟状海盆の中・南部で最も注目される地形は、海盆の中軸部に見られる中央地溝帯とその中央の裂け目に貫入している岩体(中央海山・海丘)である。

南部には、南から北に、与那国海底地溝、八重山海底地溝、宮古海底地溝が知られている(大島ほか, 1988)。また、海盆中部の地溝帯にあたる那覇の北北西約160kmには、貫入岩体が伊平屋海丘群(Fig. 8参照)をつくっている。この海域は潜水調査船でも詳しく調査され、海底から熱水が噴出しているのが発見された(木村ほか, 1987)。また、伊平屋海丘群の南方約35kmにある伊是名海穴の北東斜面の水深1550m付近で、海底熱水鉱床と共に、盛んに白い熱水を吹き上げている高さ3mのホワイト・スモーカーをはじめとする沢山のチムニーが発見された(加藤・岩渕, 1988; 加藤ほか, 1989; 中村ほか, 1990)。

沖縄舟状海盆の西側斜面(東シナ海側)は、舟状海盆を形造った撓曲運動によってできたものである。曲降には随所で断層をともなっている。北部に比べて1000m以

上も沈下量が大きい南部地域では、舟状海盆の斜面壁は海底谷の下刻が進んでいる。東側斜面(南西諸島海嶺側)の輪郭は複雑に出入りする。この一因は、舟状海盆の斜面に第四紀火山活動が重なったためである。

東シナ海の陸棚は、一般に起伏に乏しく平坦である。外縁の水深は140～160mほどである。

3. 地殻構造・地磁気・重力・地殻熱流量

3.1. 地殻構造

琉球弧の地殻断面はMurauchi *et al.*, (1968), Ludwig *et al.*, (1973)などによって得られている(Fig. 3参照)。南西諸島から以西においては、地殻が厚くなるためにマントル上面の深さは分かっていない。この地域の基盤は、およそ5.5 km/secの層からなり東シナ海陸棚の東縁部で隆起構造を示す。この上に3.4～4.6 km/sec層がある。沖縄舟状海盆を埋める堆積層(1.9～2.7 km/sec層)は舟状海盆の西縁で厚くなる。南西諸島海域の東側では、大陸斜面に著しい厚さの堆積層を認める。1984年、日本のDELP事業の一環として、沖縄舟状海盆中部の軸部を中心に地殻構造調査が行われた。その結果によると、花崗岩層と思われる6.0 km/sec層が厚く現れており、海洋性地殻はまだ生成されていない。また、舟状海盆の中軸下の上部マントルはP波速度と減衰Qが共に低く、この異常は熱的非弾性や部分熔融などに由来すると考えられている(Nagumo *et al.*, 1986)。

Fig. 4. Magnetic total intensity anomaly of the Ryukyu Arc (modified from Iwabuchi, 1989).

3.2. 地磁気

Fig. 4 は琉球弧の地磁気異常を示す。南西諸島海嶺の頂部より以西には、二つの顕著な地磁気異常帯がある。一つは南西諸島海嶺の頂部よりやや西側にあり、大筋では火山フロントに平行するもので、短波長のダイポール型の地磁気異常が卓越する(植田ほか, 1984)。この地磁気異常帯の東端を連ねる線はマグネティック・フロントと呼ぶに相応しいもので、琉球弧の顕著な地磁気異常はこのフロントより西側に限られる。もう一つの顕著な異常帯は東シナ海大陸棚の東縁に位置し、五島・尖閣隆起帯(相場・関谷, 1979)に伴うもので、この磁気基盤の磁化率は、その大半が $1 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ emu}$ であるが、一部に $6 \sim 10 \times 10^{-3} \text{ emu}$ のものがある。酸性～中性火成岩が主で、一部に塩基性岩が混在するものと推定される(春日ほか, 1992)。

沖縄舟状海盆内の地磁気異常は一般に平坦である。特に平坦なところは、舟状海盆の中央付近から西側に舟状海盆の斜面にかけて見られる。舟状海盆の北東部と南端部には 100 nT 以上に達する磁気異常が認められる。南西諸島海嶺の頂部から海溝にかけての地磁気異常は極めて静かである。

Fig. 5. Free-air gravity anomaly of the Ryukyu Arc (modified from Iwabuchi, 1989).

3.3. 重力異常

Fig. 5 に琉球弧のフリーエア重力異常図を示す。顕著な負の重力異常が海溝軸にみられるほか、深海平坦面の発達する大陸斜面のところでもみられる。海溝軸で -100 mGal を越す。深海平坦面では $-50 \sim -100 \text{ mGal}$ の負異常の地域が広がる。このような所では新期堆積物も厚くなる。

東シナ海の大陸棚東縁の五島・尖閣隆起帯には、 $50 \sim 100 \text{ mGal}$ の正の異常が認められる。沖縄舟状海盆内は一般には 30 mGal 以下であるが、堆、海丘にともない小規模の範囲で 50 mGal 以上のところがある。

3.4. 地殻熱流量

Fig. 6 は、地殻熱流量の分布を表したものである。海溝から 200 km に達する付近から急に高い領域に入る。この海域が沖縄舟状海盆に相当する。しかし、地殻熱流量の分布は局地的に変動が大きい。例えば、沖縄舟状海盆中部の中軸に当たる伊平屋海丘群の近傍で最も高い値(約 1600 mW/m^2)が得られているが、一方で隣接区域で低い値が得られなど、熱流量にばらつきが目立つ。このことは熱水循環が生じていることを示唆する(Yamano *et al.*, 1986)。

Fig. 6. Heat flow of the Okinawa Trough (in mW/m^2) (Yamano *et al.*, 1986).

4. 地質

4.1. 南西諸島海嶺の一般地質と沖縄舟状海盆の岩石

南西諸島海嶺は琉球弧における地背斜で、その地質は互いに並走する構造累帯に区別され、海嶺に見られる先中新統の構造は、西南日本外帯の地史と類似している(小西, 1965)。南西諸島で知られる最も古い地層は、いわゆる古生層で、石垣島、西表島、沖縄島、奄美大島に分布する。ただし、古生界と言われたものの多くは、中生界の一部は古第三系に属することも分かってきた。因みに、石垣島の変成岩類の Rb-Sr 年代は 202Ma である(藤井・木崎, 1983)。これらの地層の上位は、西南日本に広く見られる古第三系を中心とする四万十累層群相当層である。

さらに先中新世構造に重なって新生代の火山活動がある。中新世のグリーンタフ活動、鮮新世・前期更新世火山活動及び後期更新世～現世火山活動である(松本, 1983)。このほか、新生代の深成～半深成活動が奄美大島・徳之島(49～61Ma, K-Ar 年代)、石垣島(21Ma)などで知られている(松本, 1983)(Fig. 7 参照)。

火山フロントは、北部では海嶺の頂部に近いところにあるが、中部では海嶺の西縁に、南部では沖縄舟状海盆内の東縁に分布するようになる(Fig. 2 参照)。ただし、南部での歴史時代の活動記録は、西表島北東海底火山の噴火(1924年)のみである。

沖縄舟状海盆からはこれまでも色々の岩石が採取されている(Fig. 7 参照)。目下のところ最も古い岩石は、舟

Fig. 7. Rocks of the Nansei Syoto Ridge and the Okinawa Trough. Data from Anma 1976, Geological Survey of Japan 1976, 1978, Hamamoto *et al.*, 1979, S. Kato *et al.*, 1982, 1989, Y. Kato *et al.*, 1989, Kashima 1983, Katsura *et al.*, 1994, Kimura *et al.*, 1986, 1988, Matsumoto 1983, Nishimura *et al.*, 1983, Ocean Research Institute, University of Tokyo 1975, Oshima *et al.*, 1988 and Osozawa *et al.*, 1983. Triangle Symbols: stations of Hydr. Dept.; Black dot: stations of Geol. Surv.; Circle: stations of universities and others. G: granite, Gdp: granodiorite porphyry, QPo: quartz porphyry, Cm: camptonite, Di: diorite, Po: porphyry, D: dacite, R: rhyolite, A: andesite, B: basalt, L: limestone, M: mudstone, S: sandstone, Met: metamorphic rock, Sch: schist, Hf: hornfels, Sl: slate, Pm: pumice, hy: hydrothermal deposits. Age in Ma. (Underlined age shows possibility of contamination.)

状海盆南部の宮古海山(頂部水深 878m)の西部から、安山岩、石灰岩などとともに採取された粘板岩、閃緑岩であろう。粘板岩等は四万十累層群に対比されよう。この

Fig. 8. Sea-beam chart of the Iheya Knolls at the axis of the middle Okinawa Trough (Oshima *et al.*, 1988). A: Iheya Knolls, B: Izena Knoll, C: Izena Hole.

ほか同海山の東部からも石灰岩が採取されている。この石灰岩に含まれる化石から、宮古海山は鮮新世後期から更新世中期の間、浅い海にあったことを示している。この海山はこの時期以降の沖縄舟状海盆の沈降につれ、少なくとも数 100m は沈降したことを示している (大島ほか, 1988)。舟状海盆内での新生代の深成活動は宮古海山のほか南奄西 (みなみえんせい) 海丘にみられる。後者から得た閃緑岩の K-Ar 年代は $20 \pm 10\text{Ma}$ であるが岩石の汚染が著しい (桂ほか, 1994)。結局のところ正確な時代は分かっていない。

沖縄舟状海盆の中軸に見られる海底地溝帯とその付近には、各種の火山岩類が貫入している。多くのものが第四紀であるが、中新世後期のものもある。火山岩別にみれば、流紋岩・デイサイト (0.4, 0.6, 0.8, 8.3Ma), 安山岩 (0.2Ma), 玄武岩 (0.3, 0.4, 4.7, 10.3Ma) となる。

Fig. 8 は、沖縄舟状海盆中部の地溝帯に火山岩が貫入してできた伊平屋海丘群の例である。パイモダルの火山活動があり、火山岩の K-Ar 年代は 0.22 ~ 0.79Ma である。少し離れた海丘からは、8.3Ma のデイサイトが採取されている。全体として海底地溝帯の中央寄りで時代が若く、外側に向かって古くなる。

4.2. 地質構造

Fig. 9, 10 に琉球弧と沖縄舟状海盆の代表的な音波探査記録を示す。併せて、フリーエア重力異常と地磁気異常のプロファイルを付した。

Fig. 9 は、東シナ海側の大陸棚から南西諸島海溝にかけての音波探査記録の例で、琉球弧の特徴がよく現れている。海嶺及び海溝部を除く海域に広く分布する地層は、島尻層群 (主要部は鮮新統) とそれより若い地層である。フィリピン海側の海底の延長部が海溝軸より陸側に達しているのが垣間見られる。この部分の海溝底は埋積作用で平坦である。ここでの堆積層の厚さは約 0.5 秒 (往復) である。大陸斜面に発達する深海平坦面では、100mgal に達する負のフリーエア異常がある。南西諸島海嶺の西縁にみられる海丘は、火山フロントの位置に相当する。海丘の中央部を火山岩が貫いている。沖縄舟状海盆の中央部付近の最深部には、両側が正断層で限られる海底地溝が認められる。

東シナ海側の陸棚東縁の基盤にみられる隆起部は五島・尖閣隆起帯に相当し、ここには波長の大きな地磁気異常が認められる。磁気基盤の磁化率から、大部分が酸性～中性岩からなり、一部に塩基性岩が混在していることが推測される (春日ほか, 1992)。海上に露出する肥前島島、男女群島の地質から推察すると、表層は琉球層群・島尻層群に覆われているが、五島・尖閣隆起帯の内部の主要部は、中新世の火山岩類と花崗斑岩に代表される半深成岩類からなるものと思われる。

Fig. 10-1 断面は沖縄舟状海盆の北部を代表するマルチチャンネル音波探査記録である。舟状海盆の海底は概して平坦で、中・南部のように顕著な正断層で限られる海底地溝は発達していない。しかし、萌芽的なものが東シナ海の陸棚寄りに認められる。なお、舟状海盆全体の大構造でみると、舟状海盆そのものが地溝をなす。東側の舟状海盆斜面は明らかに断層崖に相当する。舟状海盆の西側は曲降がついた斜面である。南西諸島寄りで堆積層が厚くなる。舟状海盆の中央部には下位の地層が覗いている。

Fig. 10-2 断面は伊平屋海丘群の東部を通る。海盆底の一段低い地溝部を貫ぬく多くの火山岩があり、伊平屋海丘群を構成する (Fig. 8 参照)。火山岩の放射年代 (K-Ar 年代) は、0.8Ma より若い。舟状海盆の中で火山岩が密集

Fig. 9. Seismic profile across the Ryukyu Arc (data from Hydrographic Department of Japan). Section line A-B shown in Fig. 1.

して貫入している海域はここだけである。地形に対応した正帯磁のダイポール異常がある(大島ほか, 1988)。舟状海盆の中軸部より北側の海盆底には、緩い褶曲構造に伴って、現海底面にまで達する小規模な断層群が多数認められる。

Fig. 10-3 断面は東シナ海の大陸棚から南西諸島海嶺に至る南北断面である。舟状海盆の両側斜面は断層崖の様相を呈する。舟状海盆の中軸部には、島尻層群・琉球層群の向斜部を埋めてより新しい堆積層が認められる。ここには小規模な正断層の発達が見られる。中軸部より南側の海盆底には、時代不詳の火山岩の貫入があり、地質構造を複雑にしている。海盆底と海嶺の境は慶良間海裂に当たる。

Fig. 10-4 断面は宮古海底地溝を横断する。海盆中央の宮古海山からは種々の岩石が採取されている(Fig. 7 参照)。海山の北側の凹地は宮古海底地溝である。海山の南側の比較的平坦なところにも、現在の海底面に達するおびただしい数の断層がある。東シナ海側の南縁に沿ってここにも地溝がみられる。沖縄舟状海盆の両側を限る斜面は断層崖である。

Fig. 10-5 は八重山海底地溝の南北横断面である。堆

積層が海盆の南北から中央に垂れ下がっているが、その最深部に火山の貫入がある。ここには約 80nT の正負のダイポール型磁気異常を伴う。この岩体は酸性火山岩で K-Ar 年代は 0.62Ma である(桂ほか, 1994)。

5. 琉球弧の発達史

南西諸島海域の地質については断片的に記述してきたが、同海域の発達を総観すれば次のようになる。

南西諸島で知られる最も古い地層は、沖縄島、奄美大島などの古生界である。この他、白亜紀から古第三紀にわたる四万十帯相当層が本海域の基盤を構成する。これらの先中新統の構造は、隣接する西南日本外帯の地史に類似する(小西, 1965)。

古第三紀から新第三紀には、本州・九州地方にも広くみられるグリーンタフ変動があった(松本, 1983)。南西諸島南部の八重山群島にみられるグリーンタフ活動は、始新世のもので南西諸島海域では最も古いものである。宝島、久米島、粟国島など南西諸島中・南部には、少し時代の新しい中新世中・後期のものがみられる。グリーンタフ変動によって古い構造は解体され、現在みられる地質構造の原型が形成される過程に入った。地背斜部では、

Fig. 10. Seismic profiles across the Okinawa Trough (data from Hydrographic Department of Japan). Section lines 1-5 shown in Fig. 1.

石垣島で中新世前期に、屋久島、沖縄島では中新世後期に深成～半深成火成活動があった。活動は南西諸島南部で早かった。南西諸島南部の中新世前・中期には、海岸低地～浅海への堆積があり、この堆積盆は南部の台湾方面と繋がっていた(中川, 1983)。

その後、中新世中・後期にかけて南西諸島海域一帯は陸化した。この陸地に海水が入り堆積物が広く覆うことになるのは、中新世後期から更新世初期である。この時期に大規模海進があり、主に砂、泥、火山砕屑物からなる島尻層群(主要部は鮮新統)が堆積した。このような海面上昇と海進は日本列島を通じて認められる現象である(中川, 1983)。

島尻層群相当堆積物の分布は、沖縄舟状海盆をはじめ広く分布しているが、現在の琉球弧の構造に準じて地背

斜部あるいは周辺部では地層が薄く海盆部で厚くなる傾向から、堆積最盛期の鮮新世には、南西諸島海嶺と沖縄舟状海盆の形成は始まっていたとみられる。すなわち、南西諸島海溝の発達に呼応して海嶺部の隆起とその背後の舟状海盆での沈降が進展した。

鮮新世・前期更新世に背斜部で火山活動があり、トカラ列島の島々、沖縄島西方の栗国島、久米島などで認められる。このほか地磁気異常の解析から、松山期に活動した火山活動が第一奄美堆、鳥島堆、第四久米海丘にも想定される(植田ほか, 1984)。第四紀更新世初期の島尻層群の堆積後は、海面低下によって南西諸島海域は離水し、その陸域は大陸と接続した。その後、沈水があり琉球層群を堆積した(中川, 1983)。

沖縄舟状海盆は、前述の通り島尻層群の堆積時にその

輪郭が決まった。舟状海盆の斜面は撓曲と断層とによって形成された。舟状海盆底には海盆の一般的方向と平行する数多くの断層がみられ、とくに舟状海盆の中軸部には現海底面までも切る断層が発達する。海盆の南西部では、正断層性の階段状断層が中軸部に地溝をつくっている。堆積作用は軸部で厚く、両側に薄くなる。中軸部での連続的沈降とそれに応じた堆積があったことを示している (桂ほか, 1986)。この中軸部には火山岩が貫入しており、K-Ar 年代でもっとも古いものは 10Ma のものであるが、大部分のものは 1Ma より若い。これらの火山岩は島弧性であり、各種物理探査からも、沖縄舟状海盆は陸性地殻を下層にもち、まだ海洋性地殻は発生していない。また、海盆底の中の孤立した海丘、海山から深成岩、変成岩が採取されているが、これらは海盆形成時の解体から取り残された残丘である。

更新世・現世には、地背斜をなす南西諸島海嶺の最頂部からやや離れた西側に火山活動がおきた。これらは火山フロントをなすもので、火山活動は現在でも、桜島、開聞岳、薩摩硫黄島、諏訪之瀬島、横当島、硫黄島島まで明瞭に追跡できる。更に南方になると困難になるが、海底地形と地磁気異常の分布から八重山諸島の沖合までかるうじて追跡できる。

以上みたとおり、南西諸島海域の地形は鮮新世以降の構造運動によって形成されたものである。

References

- 相場淳一・関谷栄一 (1979): 南西諸島周辺海域の堆積盆地の分布と性格. 石油技術協会誌, **44**, 229-340.
- 安間 恵 (1976): トカラ海峡の地質構造. 琉球列島の地質学的研究, **1**, 162-175.
- Emery, K.O., Y. Hayashi, T.W. Hilde, K. Kobayashi, J.H. Koo, C.Y. Meng, H. Niino, J.H. Osterhagen, L.M. Reynolds, J.M. Wageman, C.S. Wang, and S.T. Yang (1969): Geological structure and some water characteristics of the East China Sea and the Yellow Sea. Tech. Bull. ECAFE, **2**, 3-43.
- Geological Survey of Japan (1976): Cruise Report 6, 81pp. ed. by E. Honza.
- Geological Survey of Japan (1978): Cruise Report 10, 79pp. ed. by E. Honza.
- 浜本文隆・桜井 操・永野真男 (1979): 宮古・八重山諸島周辺の海底地質. 水路部研究報告, **14**, 1-38.
- 藤井 安・木崎甲子郎 (1983): 八重山変成岩類の地質構造. 地質学論集, **22**, 15-26.
- 岩淵義郎 (1989): 水路部の火山噴火予知計画. 水路部研究報告, **25**, 1-72.
- 海上保安庁水路部 (1991): 海底地形図-日本南方海域. 日本水路協会.
- 鹿島愛彦 (1983): 琉球弧の仏像構造線. 地質学論集, **22**, 57-65.
- 春日 茂・加藤幸弘・木村信介・沖野郷子・大陸棚調査室員 (1992): 本州南方海域の島弧海溝系及び背弧海盆の特徴. 水路部研究報告, **28**, 19-53.
- 加藤 茂・桂 忠彦・平野賢治 (1982): 沖縄本島周辺の海底地質. 水路部研究報告, **17**, 31-70.
- 加藤 茂・中村光一・岩渕 洋・河合晃司・瀬田英憲 (1989): 沖縄トラフ中部の地形、地質構造と粟国海丘付近の潜航調査. 海技センター試験研究報告, 145-162.
- 加藤幸弘・岩渕 洋 (1988): 沖縄トラフ、伊是名海穴の海底地質について. 第5回「しんかい 2000」研究シンポジウム, 海技センター, 71.
- 加藤幸弘・中村光一・岩渕 洋・橋本 惇・金子康江 (1989): 沖縄トラフ中部、伊是名海穴の地形と地質. 海技センター試験研究報告, 163-182.
- 桂 忠彦・大島章一・荻野卓司・池田 清・永野真男・内田摩利夫・林田政和・小山 薫・春日 茂 (1986): 沖縄トラフ南西部海域の地質・地球物理学的諸性質. 水路部研究報告, **21**, 21-47.
- 桂 忠彦・島村国雄・大陸棚調査室員一同 (1994): 大陸棚海底サンプルの地質学地球化学的研究 (その1). 水路部研究報告, **30**, 345-381.
- 木村政昭・加藤祐三・田中武男・仲 二郎・蒲生俊敬・山野 誠・安藤雅孝・上田誠也・酒井 均・大森 保・井沢英二・兼永勝・小野朋典・押田 淳 (1987): 沖縄トラフ中央地溝の研究. 海技センター試験研究報告, 165-196.
- Kimura, M., I. Kaneoka, Y. Kato, S. Yamamoto, I. Kushiro, H. Tokuyama, H. Kinoshita, N. Isezaki, H. Masaki, A. Oshida, S. Uyeda and T.W. Hilde (1986): Topography and geology of the central grabens and their vicinity. Bull. Earth. Res. Inst., **61**, 269-310.
- Kimura, M., S. Uyeda, Y. Kato, T. Tanaka, M. Yamano, T. Gamo, H. Sakai, S. Kato, E. Izawa and T. Oomori (1988): Active hydrothermal mounds in the Okinawa Trough. Tectonophysics, **145**, 319-324.
- 小西健三 (1965): 琉球列島 (南西諸島) の構造区分. 地質学雑誌, **71**, 437-457.
- Ludwig, W.J., S. Murauchi, N. Den, P. Buhl, H. Hotta, M. Ewing, T. Asanuma, T. Yoshii, and N. Sakajiri (1973): Structure of East China Sea-West Philippine Sea margin off southern Kyushu, Japan. Jour. Geophys. Res., **78**, 2526-2536.

- 松本僊夫 (1983): 琉球列島における新生代火山活動. 地質学論集, **22**, 81-91.
- Murauchi, S., N. Den, S. Asano, H. Hotta, T. Yoshii, T. Asanuma, K. Hagiwara, K. Ichikawa, T. Sato, W.J. Ludwig, J.I. Ewing, N.T. Edgar, and R.E. Houtz (1968): Crustal structure of the Philippine Sea. Jour. Geophys. Res., **73**, 3143-3171.
- Nagumo, S., H. Kinoshita, J. Kasahara, T. Ouchi, H. Tokuyama, T. Asanuma, S. Koresawa and H. Akiyoshi (1986): Report on DELP 1984 cruises in the middle Okinawa Trough. Bull. Earth. Res. Inst., **61**, 167-202.
- 中川久夫 (1983): 琉球列島新生代地史の概要. 地質学論集, **22**, 67-79.
- 中村光一・丸茂克美・青木正博 (1990): 沖縄トラフ伊是名海穴海底熱水性鉱床地帯におけるブラック・スモーカーと二酸化炭素に富む流体湧出変質帯 (ポックマーク) の発見. 科技センター試験研究報告, 33-50.
- 西村裕二郎・松原 康・中村栄三 (1983): 八重山 変成岩類の変成分帯と K-Ar 年代. 地質学論集, **22**, 27-37.
- Ocean Research Institute, University of Tokyo (1975): Preliminary report of the Hakuho Maru cruises KH-72-2, 144pp.
- 大島章一・高梨政雄・加藤 茂・内田摩利夫・岡崎 勇・春日 茂・川尻智敏・金子康江・小川正泰・河合晃司・瀬田英憲・加藤幸弘 (1988): 沖縄トラフ及び南西諸島周辺海域の地質・地球物理学的調査結果. 水路部研究報告, **24**, 19-43.
- 遅沢壮一・相田吉昭・中森 亨・新部明郎・蟹沢聰史・中川久夫 (1983): 奄美大島の地質, とくに重力滑動と崩壊による地質の構成について. 地質学論集, **22**, 39-56.
- 植田義夫・中川久穂・登崎隆志 (1984): 南西諸島周辺海域の地磁気異常. 水路部研究報告, **19**, 75-100.
- Yamano, M., S. Uyeda, and H. Kinoshita (1986): Report on DELP 1984 cruises in the middle Okinawa Trough, heat flow measurements. Bull. Earth. Res. Inst., **61**, 251-267.