

沖縄トラフの発生と形成

木村 政 昭*

Genesis and formation of the Okinawa Trough, Japan

Masaaki KIMURA*

Abstract Recent geologic and geophysical data revealed that the Greater Okinawa Trough consists of two troughs such as the Old and New Okinawa Troughs. The Old Okinawa Trough had been formed during Late Miocene to Pliocene time as a big graben in the continental margin. And then, the New Okinawa Trough, so-called Okinawa Trough, has been formed since some time in Early Pleistocene time (2-1.5 Ma). The present time is regarded as a continental rifting stage in the Okinawa Trough because of no oceanic crust detected beneath the Okinawa Trough. There exist central rifts in the Okinawa Trough, which are centers of the magmatic uplifting in both of the Okinawa Trough and the Greater Okinawa Trough.

The central rifts are most active in the trough at present. There, discovery of a black smoker was reported at one of active hydrothermal vent systems in 1989. Seismic reflection and submarine drilling data strongly show eastward migration of the big trough-type sedimentary basins during Neogene time.

1. はじめに

大陸縁辺に形成されつつある活動的な沖縄トラフ (Fig. 1) にとって, 基本的に重要な問題点は, 沖縄トラフははたしてどのようなメカニズムで作られたのであるかといった点であろう。沖縄トラフで初めて中央地溝の存在が指摘されて (木村ほか, 1975) 以来, HERMAN *et al.* (1978) は, 音波探査 (エアガン, シングルチャンネル) により, トラフ南部で中央地溝を確認した。そして, 沖縄トラフが海底拡大で形成されたとしたら, その運動は後期中新世-初期鮮新世後のいつかに行われたとした。その後, 沖縄トラフ全域に中央地溝が雁行状に存在することが示された (木村, 1983a)。そして, 沖縄トラフ中部中軸部で顕著な地磁気縞異常が長崎丸の航海により認められた (木村ほか, 1985)。これを受けて1984年の DELP 沖縄航海により, 中軸部の地磁気異常が第四紀の海底火山に対応することが明らかにされ, さらに中

部における中央地溝の雁行配列が再確認された (KIMURA *et al.*, 1986)。

1986年には, 「しんかい2000」による潜水調査で, 世界の背弧海盆あるいは凹地に先駆けて, 沖縄トラフで, 活動的な熱水性マウンドが発見された (KIMURA *et al.*, 1988)。その後, 西ドイツと日本の共同調査等があり, 沖縄トラフ中部中央地溝に摂氏300度以上の高温の重金属を含む熱水を噴出するブラックスモーカーや熱水鉱床, 熱水性生物コロニー等が次々と確認された (中村ほか, 1988; 木村ほか, 1988; HALBACH *et al.*, 1989, 木村ほか, 1989, 海洋科学技術センター プレス発表, 1989)。しかし, 沖縄トラフの形成時期や機構等を解明するにはまだいろいろな問題点が残されている。ここでは, これまで公表された, 東京大学海洋研究所, 通産省地質調査所, 海上保安庁水路部をはじめとする内外の機関により得られた資・試料および筆者らの得たデータに基づいて, 沖縄トラフの形成について考察してみたい。

本研究をすすめるにあたって, 有孔虫鑑定を行っていた山形大学の西弘嗣氏, 古水系の議論をいただいた琉球大学の諸喜田茂光氏, 小論を世に出す機会を与え

* 琉球大学理学部海洋学科
College of Science, Department of Marine Sciences, University of the Ryukyus, Senbaru 1, Nishihara, Okinawa 903-01, Japan.

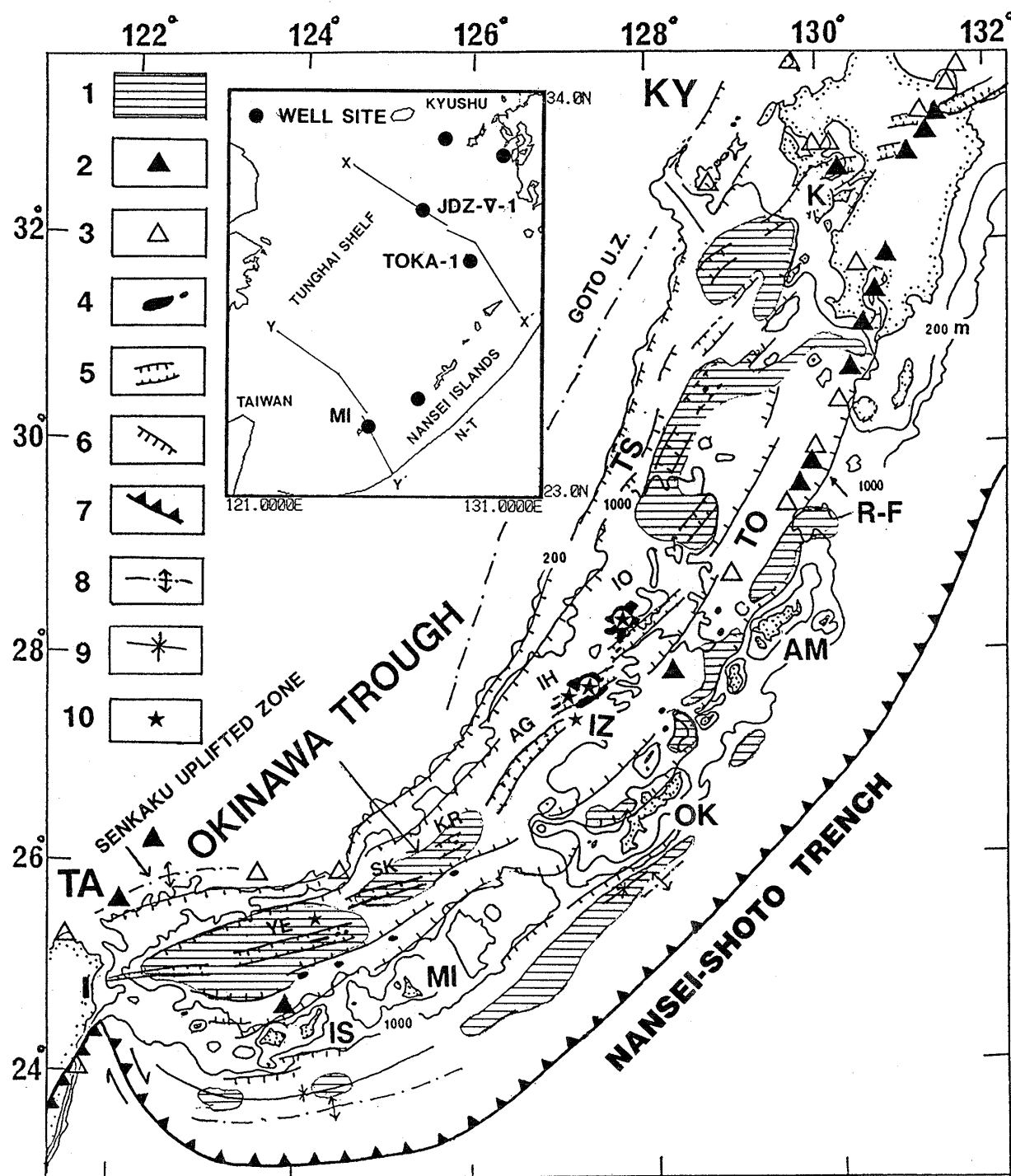


Fig. 1. Geosstructural map of the Okinawa Trough, revised from KIMURA(1985). TS : Tunghai Slope, TO : Tokara Belt, R-F : Ryukyu Ridge Fault. IO : Io Graben, IH : Iheya Graben, AG : Aguni Graben, KR : Kerama Graben, SK : Sakishima Graben, YE : Yaeyama Graben, KY : Kyushu, K : Kuchinotsu, AM : Amami-oshima, OK : Okinawajima, MI : Miyakojima, IS : Ishigakijima, TA : Taiwan, I : Iran. Legend : 1. Early Pleistocene sedimentary basin of Layer B₃. 2. Active volcano, 3. Quaternary volcano, 4. Quaternary submarine volcano, 5. Central graben, 6. Active fault. Tooth shows 9 down thrown side. 7. Trench or convergent plate boundary. Tooth shows a down thrusting direction. 8. Anticline, 9. Syncline, 10. Active hydrothermal area.

Inserted map shows location of Nansei Islands and cross sections X-X' and Y-Y' represented in Fig. 3. N-T : Nansei-shoto Trench.

Age Ma		Okinawa Trough (Greater Okinawa Trough)		Nansei Islands	
0.14	Holocene	A		Alluvium	
	Pleistocene	B	B 1	Minatogawa Limestone	(3)
			B 2	Naha Limestone	
			B 3	Kunigami Gravel	
0.7	Early			Chinen, Nakoshi sandstone	↓
2.5	Pliocene	C		Shimajiri Group	↑ (2)
5	Miocene				↓
10					↑
15					
24	Paleogene	Unconformity	D	Aradake F. (Green Tuff)	(1)
37				Yaeyama Group	
54				Nosoko F. (Green Tuff)	
64				Kayo Formation	
100	Cretaceous	E		Nago Formation	↓
	Jurassic			Motobu Terrane	
	Triassic				
	Permian			Tomuru Formation	

Table 1. Stratigraphic sequence of the Greater Okinawa Trough and that of Nansei Islands. Pre-Pleistocene stratigraphy on Nansei Islands were mainly referred from UJME (1989).

て下さった島根大学の三梨昂氏に謝意を表したい。なお、本研究の一部は科学研究費一般研究(A)による。

2. 沖縄トラフの定義

背弧海盆あるいは背弧凹地としての沖縄トラフ (Okinawa Trough) あるいは沖縄舟状海盆と通常呼ばれている所は、南西諸島の西側海底に平行して走るほぼ琉球弧の長さに匹敵する海底のくぼみである。北部ではほぼ500m等深線、中部では1000m、南部では1000m等深線でかこまれた海盆をさしている。そこは、和船の底のような比較的平底の舟状の海盆部である (Fig. 1)。これを狭義の沖縄トラフあるいは真性の沖縄トラフとする。その中軸に中央地溝 (central graben あるいは割れ目系としてとらえる場合は central rift) がある (Fig. 1の凡例5)。この中央地溝は幅10-20kmほどあり、しばしば、その縁辺に、marginal swell 状に海丘の高まりが存在する。さらに、その地溝中に、地形的落ちこみや切れ込み

がみられることがある。これを中軸谷 (rift valley) とする。これは、沖縄トラフ中・南部に典型的に認められる。

沖縄トラフの両側に断層や褶曲変形を受けた地帯がある。これらは沖縄トラフの縁辺リフト帯 (rifted margin) といえる。西側は東海陸棚斜面帯 (Tunghai Slope Belt)、東側の破碎帯はトカラ列島を含むのでトカラ帯とされる (KIMURA, 1985)。これは、中新世のいわゆるグリーンタフ地域と第四紀火山フロント (前線) が存在する地帯である。さらにその両外側に縁辺台地 (marginal plateau) 的に東海大陸棚と琉球外弧 (琉球海嶺) がある。一方、沖縄トラフを東海大陸棚と南西諸島との間のへこみと解釈すれば、以上の東海大陸棚縁辺付近から琉球海嶺西縁までが沖縄トラフとなる。地質構造的にも、この範囲は一連のものとみなされる (Fig. 2)。したがって、これを大沖縄トラフ (Greater Okinawa Trough) とする。これは“広義の沖縄トラフ”というべ

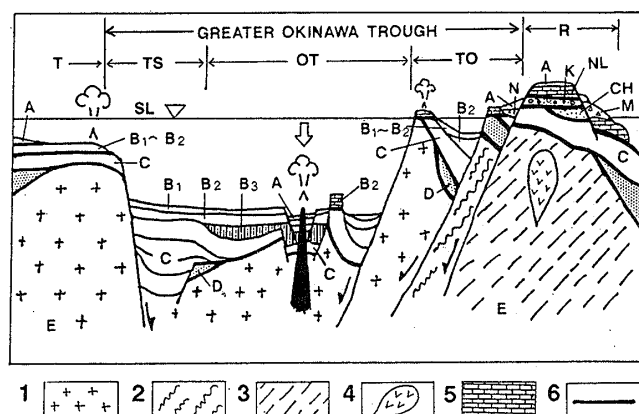


Fig. 2. Schematic, geologic cross section of the Okinawa Trough (no scale). Layers E-A are shown in the Table 1. White arrow shows the central rift. Active volcanic activities occur along the major faults including the central rift. T : Tuguehai Shelf, TS : Tuguehai Slope, OT : Okinawa Trough (basin), TO : Tokara Belt, R : Ryukyu Ridge, SL : Sea level, CH : Chinen sandstone, N : Nakoshi sandstone, NL : Naha Limestone, M : Minatogawa Limestone, K : Kunigami gravel. Legend : 1. Ryoike Terrane, 2. Chichibu Terrane, 3. Shimanto Terrane, 4. Paleogene and Miocene intrusive rocks (andesite, granitic rocks), 5. Limestone, 6. Unconformity.

きであろう。地質構造的にみると、大局的には、大沖縄トラフの中は、狭義の沖縄トラフの中央地溝を中心として、その両側の地塊は反対側に傾動している。この傾動傾向は、両側の marginal plateau 的な五島隆起帯や琉球海嶺にまで幾分及んでいる。

沖縄トラフ中部から南部にかけては、1984年および1988年に行われた DELP 沖縄航海その他により、活動的な中央地溝の雁行状配列が明らかになった。(KIMURA *et al.*, 1986, 1989, 大島ほか, 1988)。またこれらの中軸の地溝と地溝の間にそれを結ぶような、いわゆるトランスフォーム断層のような断層は認められていない。中央地溝内は活断層が卓越し、現在最も活動的な所といえる。沖縄トラフのなかでも中部の伊平屋海底地溝あるいは伊平屋海凹と呼ばれる中央地溝がある。ここで、伊平屋海底地溝 (Iheya submarine Graben あるいは Iheya Graben) は地質構造に付けられた名で、伊平屋海凹 (Iheya Depression) は海底地形名に付けられた名である。ここでは、中軸谷が発達し、そこに新期の火山岩の貫入が認められ、最も火成活動が活発である (Fig. 2)。

南部中軸部では、東北東—西南西方向に伸びるグラバーンが存在し、先島海底地溝とよばれる。その両側に傾

動地塊として第一宮古海丘や宮古海山といった海丘・海山が存在する。より南では八重山海底地溝とされる中央地溝が存在する。八重山海底地溝は、宮古海山の南に位置し、わずかに蛇行しているが、大局的にはほぼ東西方向を示している。ここでの特徴は、中軸谷中に最新期の堆積層と思われる音響的透明層が認められることである。八重山海底地溝中には、火山が認められる。伊良部海丘、八重山中央海丘およびその他の海丘があり、さらに海底表面には出ていない貫入岩体がある。

沖縄トラフ北部については、必ずしも地形的に、断層崖がはっきりしていない点があるために、中央地溝の存在が認められていない面がある (たとえば大島ほか, 1988 ; SIBUET *et al.*, 1987)。しかし、エアガン記録によれば、表面は埋積されている場合があるが、構造的には第四紀のグラバーン (地溝) が明らかに認められる。Fig. 1 の北部の中央地溝は、それが示されている。あるいは、半地溝として認められる。また、微地形にはそれらがしばしば認められる。ただし、地形的にも認められるような中軸谷の発達は見られない。その点では、構造の発達段階で中・南部とは異なるとみられる。

沖縄トラフは、北半部と南半部とでは地質構造が異なるとされている。確かに、地形的には、南部が深く水深2000mを超し、海盆の発達が良い。そして、中軸谷の発達も良い。地殻も薄い。しかし、グラバーンとしての基本構造の差異はほとんどないといった特徴を示す。

3. 沖縄トラフの第四紀火成活動

3-1. 火山フロント

沖縄トラフの中央地溝と琉球外弧との間に、第四紀の火山が線状に配列する。第二久米海丘とその西側の小海丘、第一宮古海丘、多良間海丘、石垣海丘等と呼ばれる小海丘列もそうであるとみなされる。音波探査記録 (エアガン) によると、それらはより古い基盤岩の上に火山が形成されたものと判断される。琉球弧の火山フロントについては、沖縄島火山がその南限でその南にはないといった見方や、火山フロントはそこから尖閣列島へ連なるといった見方、そして最近では、沖縄島火山から南は沖縄トラフの中軸の火山に連なる等といった見方がある (SIBUET *et al.*, 1987)。これまでの試・資料を検討すると、第四期火山フロントは、沖縄島火山からそのまま南へ、トカラ帯に位置する西琉球海丘列を経て台湾付近まで延長しているとみられる。また、この位置が、地震活動からみると、和達—ベニオフ帯の100km 前後の深さに相当する。これらのことから、中・北部同様、南部も火山フロントは、トカラ帯に連続存在するとみるのが

合理的にみえる。

3-2. 中央地溝の火山岩と地殻構造

沖縄トラフの中には中軸部をはじめとして、火山岩露頭が数多く認められる。その多くは、石英安山岩～安山岩質軽石および溶岩である。そして、中軸の一部からそれらに混ざって olivine augite basalt 等の玄武岩が得られている。それらは島弧に特徴的な岩石であり、海洋地殻内での火成活動を示唆する MORB 的な岩石は得られていない (KIMURA *et al.*, 1986; 1989)。1984年のジャンシャルコ号航海によって八重山海底地溝の中軸谷中の小海嶺から得られた岩石はソレライトであるが、これも島弧的なものである (加藤祐三鑑定)。同じ海嶺から「拓洋」により、石英安山岩から玄武岩までが得られている (大島ほか, 1988) ことも、これを示唆している。ただし、HERMAN ら (1978) は、八重山グラーベン中の海丘から比較的新鮮な玄武岩を得たとし、LEE *et al.*, (1980) は、その下に海洋性地殻があるとした。しかし、化学分析値等は示されていない。その同じ海丘と思われる海丘から1988年の DELP 航海の際、ソレライトを得た。しかし、これはやはり島弧的とみられる (Ishikawa *et al.*, 1989)。このほか、rare earth element の検討からも、沖縄トラフ中部中軸部の岩石が島弧のものであるという結論が得られている (本間ほか, 1987)。ただし、中軸で得られた玄武岩と石英安山岩の酸素分圧 (oxygen fugacity) からは、島弧よりも海嶺と似た環境を示唆する結果が出されている (佐藤博明分析; ISHIKAWA *et al.*, 1989) ことから、本域の岩石は展張性の背弧海盆のメカニズムを反映していると思われる。

地殻構造については、かつて LEE *et al.*, (1980) が、沖縄トラフ南部に海洋性地殻の存在を示した。しかし、DELP 航海その他最近の屈折法地震探査によると、中軸下に大陸性地殻の存在することが明らかになってきた (NAGUMO *et al.*, 1986; DELP88 航海・地震探査グループ, 1989)。したがって、沖縄トラフ内はどこにも大洋性地殻は存在せず、海底拡大は行われていないということになる。

3-3. 熱水活動

沖縄トラフでは、1986年に伊平屋海凹内で熱水性ベントが見いだされて以来 (KIMURA *et al.*, 1988)、これまで、沖縄トラフ内では、硫黄海底地溝の奄西海丘、伊平屋海底地溝のなつしま84-1海丘および伊平屋小海嶺と粟国海底地溝の東端の伊是名海穴、南部の中央地溝である八重山海底地溝の八重山小海嶺等で相次いで、熱水性鉱床、生物、活動的なチムニー等が発見された。以上の熱水地点のうち、伊是名海穴では熱水性硫化鉱床が得ら

れ、東北日本でみられるような黒鉱鉱床が現在生産されているものではないかとされた (中村ほか, 1988; HALBACH *et al.*, 1989; 木村, 1989; 木村ほか, 1989)。このうち、八重山海底地溝を除いてはすべて、海洋科学技術センターの「しんかい2000」の潜水調査により活動的熱水性ベントが確認されている。1989年の「しんかい2000」の潜航調査によりブラックスモーカーが発見された (海洋科学技術センター プレス発表, 1989)。八重山海底地溝では、地溝内の八重山小海嶺の水深2000mにおいて生物コロニーの発見や海水の揺らぎが報告されている (桂ほか, 1986)。

伊是名海穴 (Izena Hole) (中村ほか, 1987) は、粟国海底地溝 (KIMURA *et al.*, 1986) の東端に位置し、多分そこに生じた陥没部とみられる。伊是名海穴の北東壁からは、多量の材木状軽石 (石英安山岩質)、見かけが灰色の砂岩塊にみえる凝灰岩や、珪化作用を受けた硬質な酸性凝灰岩、変質した lapilli tuff, そして多孔質な aphyric andesite 等が得られている (KIMURA *et al.*, 1989)。

4. 沖縄トラフの形成時期

4-1. 沖縄トラフからの証拠

沖縄トラフの調査によって得られた直接的証拠によって、いつ沖縄トラフが形成されたか推定してみたい。①後期中新世～初期更新世の島尻層群に対比される地層 (C層) が、変位を受けて大沖縄トラフおよび沖縄トラフの大グラーベンを形成している (Fig. 3)。島尻層群の堆積が170万年前頃まで行われている。②C層を一部不整合関係で被覆して、更新世初期と思われる地層が沖縄トラフ内に ponding sediments として存在している。音響層序的にみた場合、最下位が B₂ 層で、これは初期更新世の160-50万年頃の堆積とみられる。以上から、狭義の沖縄トラフの形成は初期更新世の2-1.5Ma 頃から始まったとみられる。B₁ 層の上位の B₂ 層は中期更新世の50-12万年前、B₁ 層が後期更新世の14万年以降の堆積と推定される。A層は完新世。③本域に広く発達する琉球石灰岩は第四期 (中川, 1988) に入ってから形成された。この礁性石灰岩は沖縄トラフの陥没が生じ、大陸から切り離され、土砂のこないきれいな海に隔離された島々で初めて形成されたと考えられる。

現在の沖縄トラフの中央地溝の両側あるいは片側にしばしば marginal swell 状の高まりが海丘となって存在する。それらの海丘頂部から第四期更新世の琉球層群に対比される石灰岩や砂岩がドレッジされている。これらは、得られた海丘の頂部が平坦であるところから、沖縄トラフ陥没後の傾動しかつ孤立した地塊が、海面侵食に

より平坦化された後に生成されたものとみられる。たとえば、宮古海山の水深1050mから石灰岩がドレッジされている。それは浅海性底生有孔虫と、鮮新世後期 (N. 21) から更新世中期 (N. 22) に生存した浮遊性有孔虫 (*Groborotalia tosaensis*) を含む (大島ほか, 1988)。これは琉球石灰岩に対比されよう。また、沖縄トラフ北部の中軸付近にある西トカラ海丘 (木村, 1983b) から、フランスのジャンシャルコ号航海 (SIBUET *et al.*, 1987) の際、泥質砂岩がドレッジされた。その中の浮遊性有孔虫は Matuyama / Brunhes の境界付近 (中期更新世) と考えられる (西弘嗣鑑定)。ここでは、琉球石灰岩層と酷似した礫性石灰岩も得られており、これらは琉球層群に対比されよう。琉球石灰岩のような礫性石灰岩を含む特徴的な層の広大な発達、南西諸島域に更新世になるまでないことから、この対比は大きくはずれることはない。更新世になり、琉球列島は大陸から切り離され、大陸の土砂が直接届かないきれいな島の周りに珊瑚礁が発達し、琉球石灰岩が形成された。しかし、中軸付近の海丘上に更新世の礫性堆積物が堆積していることは、沖縄トラフは更新世のある頃までは比較的浅かった事を示している。沖縄トラフの地溝形成後、孤立した傾動地塊上の浸食面に、更新世中期頃まで石灰岩が発達していたのであろう。

以上より、沖縄トラフ中軸付近は、数十万年前までは浅海であり、それ以降急速に深海化したことになる。ちょうどその更新世中期頃、ほぼ75万年前以降トラフ中軸部の中央地溝に貫入岩の地表噴出が始まった。伊平屋海底地溝の火山岩の年代をみてみよう。たとえば、その地溝中のなつしま84-1海丘の, dacitic andesite が $0.20 \pm 0.08\text{Ma}$, 伊平屋海丘の, olivine augite basalt が $0.42 \pm 0.19\text{Ma}$ (KIMURA *et al.*, 1986) である。これらから、火山の貫入時期は数10万年かそれよりも若いだろうということが推定される。また、古川ほか (1989) は、地磁気異常の研究から、中軸部の貫入はほとんど最新の正磁極期に行われたとしている。すなわち中央地溝への火山岩の主な貫入は、中期更新世以降に行われたとみられる。中央地溝そのものは、後期更新世に対比される B_1 層が断層により切られて形成されている。このことから、更新世中・後期に火山岩の貫入を伴いながら中軸の地溝形成が進んだということになる。ここで、火山岩貫入は、中軸の堆上の石灰岩形成が更新世中期頃までであるとすると、その後、沖縄トラフ中軸部が地溝形成・火山活動を伴いながら深海化したわけである。しかも、この深海化は大沖縄トラフ域を含めて起こらなければならない。中軸への火成岩貫入に伴って中央地溝の形成が促進さ

れ、中軸部を含み大沖縄トラフが陥没した、すなわち、この期に沖縄トラフ全体の陥没が進行したことになる。沖縄トラフ内の堆積層 (B_3, B_2) は中軸部に向かって厚くなっており、断層で変形を受けている。それらの断層は堆積中に生じている。したがって、同層堆積時にはすでにトラフの中央地溝の形成があったと考えられる。その時以来、中軸でのマグマ上昇が行われていたのであろう。しかし、火成岩はほとんどすべておよそ75万年以降に主な貫入のイベントがあった。

沖縄トラフの堆積物コアの非破壊ガンマー線スペクトロメトリ法による堆積物の堆積速度の算定によると、所によりかなり大きな差異があるが、現在の堆積率は、年間2~7mm というかなり速い割合である (棚原ほか, 1989)。しかし、中央地溝中の堆積速度は $1.3\text{mm}/\text{年}$ が妥当であるらしい (大森保, 私信)。伊平屋海凹中のリフトバレー (中軸谷) である「若潮小海盆」中にはおよそ20mほどの厚さの堆積物が堆積している。したがって、このリフトバレーは形成されてからはほぼ1.5万年ほどはたっているということになる。すなわち、中央地溝中の透明層の主体はほぼ完新統といってよい。これは、付近の海底谷から運搬されてきた物が主体となっているのであろう。これより、それに被覆されているトラフ底表面をかなり一様に被覆している B_1 層は後期更新統ということになり、これまでの推定と矛盾しない。沖縄トラフ南部の八重山海盆のエアガン (マルチチャンネル) のプロファイルから、海盆を埋積している堆積層の厚さは、中心部で一番厚く、そこではほぼ2kmである。これを単純に既述の現在の堆積率で計算すると約150万年となる。これもトラフ形成が更新世初期に行われたことを支持する。

4-2. 堆積盆の比較からの証拠

Fig. 3 は、東海大陸棚から沖縄トラフにかけての模式的な地質断面図である。これは、相場・関谷 (1979)、楊 (1983) および周・殷 (1985) にオリジナルデータの再検討を加えたものである。これは、マルチチャンネルの反射法地震探査記録に基づくものである。沖縄トラフ付近については、ボーリング (Fig. 3) やドレッジによる結果が加味されている。東海大陸棚については未公表のものが多いが、ボーリングデータがかなりあり、それらを参照している。筆者が再解析したのは国のマルチおよびシングルチャンネルのこれまでに得られた反射記録ないしボーリング試・資料等である。マルチチャンネル反射記録では、C層 (N_1-N_2+Q) のベースの不整合は明瞭に追跡され、これはボーリングで確認されている。したがって大沖縄トラフの堆積盆の基本的地質構造は明らかに

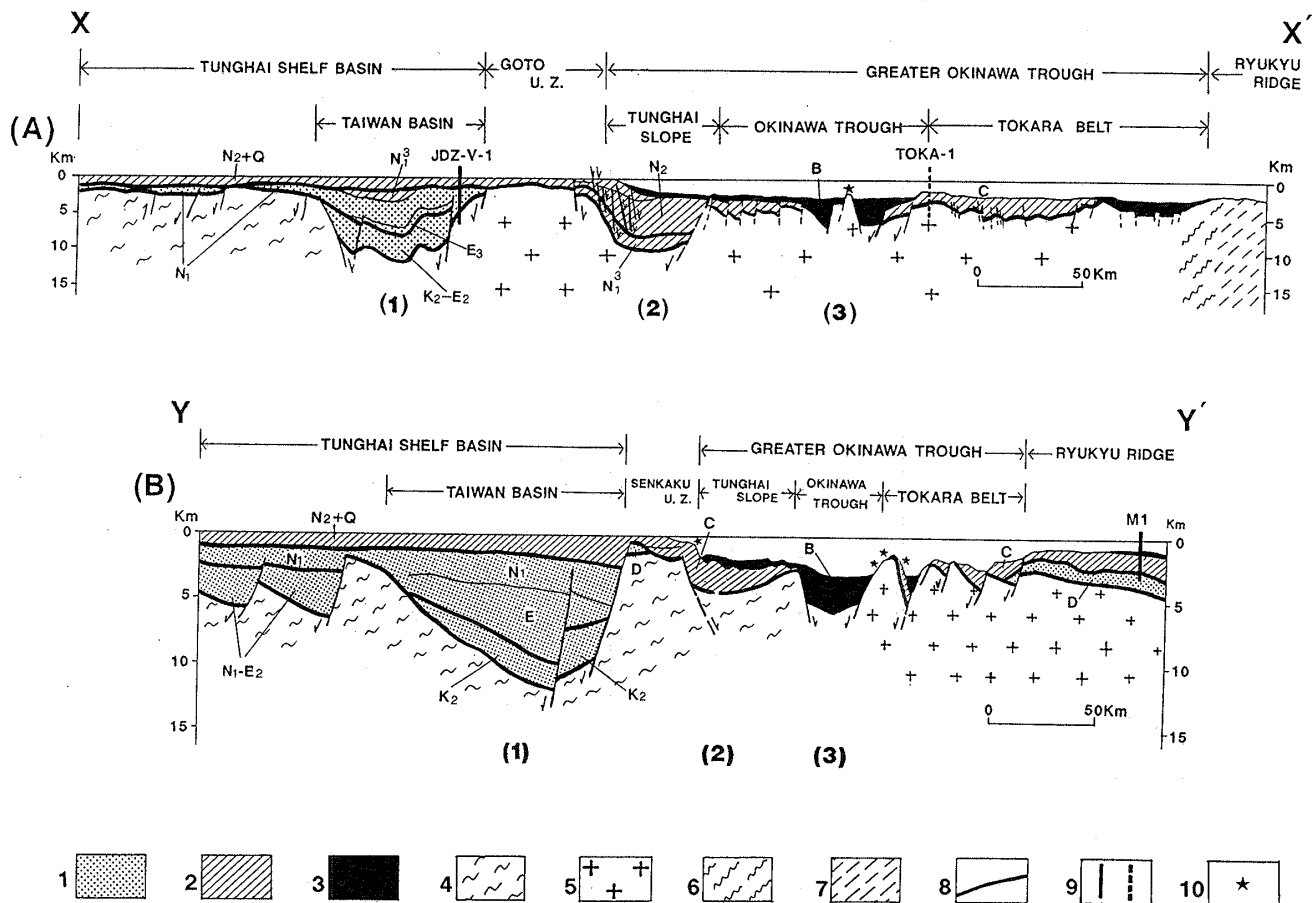


Fig. 3. Geologic cross sections ranging from the Tunchai Shelf via Okinawa Trough to the Ryukyu Ridge. (A) represents the northern part and (B) southern one. Locations are represented in Fig. 1. Interpretation is based upon those by ZHIWU and PEILING (1985) and ZHAOYA (1983) in the Tunchai Shelf, and Aiba and SEKIYA (1976) and KIMURA (1985) in the Okinawa Trough. Layers D, C and B are shown in Table 1. K₂: Upper Cretaceous, E₁: Paleocene, E₂: Eocene, E₃: Oligocene, N₁¹: Lower Miocene, N₁²: Middle Miocene, N₁³: Upper Miocene, N₂: Upper Miocene, Q: Quaternary. Legend: 1. Upper Cretaceous-Middle Miocene, 2. Upper Miocene-Early Pleistocene, 3. Early Pleistocene-Recent, 4. Upper Jurassic to Lower Cretaceous volcanics, 5. Upper Cretaceous granitic rocks including Ryoike Terrane, 6. Chichibu Terrane, 7. Shimanto Terrane, 8. Unconformity, 9. Well site. Broken line shows the well site which is located away from the cross section, 10. Dredge site.

なったといつてよい。大陸棚下については、より下位層までマルチチャンネル記録で認められること、ボーリングとの対比で、東海大陸棚の主部を占める台湾堆積盆 (Taiwan Basin; WAGEMAN *et al.*, 1970) の基本地質構造は大局的には明らかになったといつてよい。したがって、堆積盆の層序決定についてはかなり根拠があると言える。

東海大陸棚の台湾堆積盆は、北部では西湖凹陷、南部では基隆凹陷といわれる広大な堆積盆である。幅50-100 km のグラーベンあるいは半グラーベンの沈降域に厚さ10km 程の堆積物が埋積している。これらは後期白亜紀-古第三紀にかけての地層によって埋積されているた

め、後期白亜紀から形成を開始し、中新世初期から中期までの堆積層をためていたことになる。特に、古第三紀から中新世中期層の発達は顕著である。

その東方には、五島・尖閣隆起帯 (釣魚島隆起帯) があり、そのさらに東方、現在の東海大陸棚から沖縄トラフ斜面下に6 km 以上の厚さの堆積物を堆積させているかなり大規模な堆積盆が存在する (東海斜面堆積盆) (陸棚前縁盆地; 周・殷, 1985)。この陸棚前縁盆地には後期中新世以降の層が堆積している。海盆形成時の堆積物の主体は後期中新世から鮮新世の堆積物とみなせる。さらにその東方に、沖縄トラフの堆積盆 (狭義の沖縄トラフ) がある。これは、鮮新世の堆積層を変形させて形

成された海盆, すなわち, 第四紀の海盆である。したがって, 大沖縄トラフはその西縁に陸棚前縁堆積盆, 中央に沖縄トラフという2つの堆積盆(トラフ)を含んでいることになる。

以上をまとめると, この地質断面によると, 西側の台湾堆積盆(1)は後期白亜紀—中中新世, 陸棚前縁堆積盆(2)は後期中新世—鮮新世に形成されて, 沖縄トラフ(3)は第四紀に入ってから形成されたということになる(Fig. 3)。これによると, 新生代に入ってから, 西から東へと堆積盆が移動してきたことが明らかである。そして, それからの海盆は西から東へ順々に新しい堆積物により埋積されてきた様子が明瞭である。一見, 規模はだんだん小さくなっている。ただし, 現在の大沖縄トラフは, 幅150-200kmほどあり, これがすべて埋積されると, 台湾堆積盆に匹敵するような堆積盆となる。

また, これらの堆積盆の水平分布をみると, 現在の沖縄トラフと平行して, ほぼ同じ長さで存在している(周・殷, 1985)。幅は台湾堆積盆が最大, 陸棚前縁堆積盆がこれに次ぐ大きさをもつ。これは, 明らかに, 沖縄トラフが, かつては東海大陸棚にあったものが, 東方へ移動してきたことを示すものである。Fig. 3による限り北部と南部の堆積盆の様子は, スケールの差はあるが, 基本的な差はほとんどないように見える。次に, 沖縄トラフ形成の過程を検討してみたい。

5. 先沖縄トラフ期

5-1. 台湾堆積盆形成期

Fig. 3の断面において, 新期の堆積層が東方へ移動している状態と, 東海大陸棚下の大グラベンである台湾堆積盆の形成により, 東側の地塊が東方へ傾動した様子が読みとれる。これまで国内外の諸機関により得られた岩石試料および地震探査反射法・屈折法資料等により, 後期中新世以降の地層をはいで沖縄トラフ内の地層をみてみよう。基盤に関しては資料が限られているために, 未だ想像の域をでないといった方が正しい段階である。ただ, かなり確かなことは, 狭義の沖縄トラフ海盆内で得られたC層相当層である後期中新世—初期更新世の島尻層群より古い岩石は, 一部はっきりしないものを除くとすべて白亜期かそれ以前の岩石である。しかし, それらはすべてトラフ中の高まりの部分からのボーリング(TOKA-1)やドレッジである(Fig. 3)ので, 最低所下の基盤については未確認である。しかし, 岩石試料とマルチチャンネル音波探査記録, それによるスタッキング速度および屈折法地震探査との対比からはほぼ最低所にも先第三系がC層に直接すると思われる。

以上のデータにより, 中新世の初—中期の地層が堆積している頃の状態を復元してみよう。その頃は大陸棚下で大グラベンが発達していて, 五島隆起帯から沖縄トラフにかけ, 大陸とは逆の東に傾く傾動地塊をなしていたと思われる。すなわち, 大陸のへりにあって, 大陸の展張構造の一環としてのリフトがこのような形で生じていたのである。そのリフト帯の最東縁が現在の琉球海嶺断層付近までであった。それより西に大局的には五島隆起帯とトカラ帯の2列に沿って背弧的な火成活動, いわゆるグリーンタフ活動が行われた。琉球弧南部には始新世のグリーンタフがあるから, このような断層形成は, 多分始新世にも一部行われたと思われる。また, そのリフトは, より遡って白亜紀の和泉層群堆積時にはすでに形成されていたかもしれない。和泉層群は西南日本外帯の内側, 中央構造線の北に位置し, 後期白亜紀のトラフ状の堆積盆中の堆積物であり, 酸性凝灰岩を多く含む。その目で見ると, 石垣島の富崎層は和泉層群と同様なトラフ内の層に対比される可能性がある。昔から大陸で行われていた展張運動により, そこに古くからリフトが発達していてもおかしくない。

新生代に入ってから, 始新世には南部でグリーンタフ(石垣島)が認められる。おそらく, 始新世の頃は, この地域は背弧域であり, 火山フロントはより東に存在したであろう。しかし, これらのリフト形成は, 大陸周辺に一般に認められる現象で, 現在の沖縄トラフ形成がこの時代から始まったといえない。一応無関係といえる。より新しい中新世の頃の火山フロントの根っこは, おそらく“^{おも}茂登花崗岩”や琉球列島外弧の南西諸島の島々に認められる花崗岩類や安山岩類と思われる。この火山前線は西南日本外帯に続く。

琉球弧にはこれまで漸新統は見つかっていない。したがって, 漸新世—初期中新世には, 東海大陸棚の縁辺から琉球弧にかけて隆起が行われ, 漸新世の地層はほとんど堆積しなかったか, しても削剝された可能性がある。それは, 地殻変動によるものかそれとも海面変動によるものかは必ずしも明らかでない。しかし, 屈折法地震探査で現在の海溝斜面下に厚く認められる堆積層はその時の削りかすのたまったものかもしれない。中新世初期からは日本海の拡大が行われた時期である。おそらく, 東海大陸棚のいわゆる台湾堆積盆形成時に日本海の拡大に先だって, 琉球弧域で隆起が広く行われたのかもしれない。

以上まとめると, 古第三紀始新世頃の台湾堆積盆の地溝形成の時期には, 現在の石垣島付近まで背弧域であった可能性がある。そして, 台湾堆積盆を中心として, そ

の東側の地溝形成がそこまで及んだとみられる。その地溝運動期に、石垣島のグリーンタフが形成されたのであろう。その後、中新世中期に台湾堆積盆の地溝運動が最高潮に達した。その時の割れ目は、久米島付近（グリーンタフ活動あり）から沖縄本島西縁にまで及んでいたであろう。この期には、日本海で堆積盆形成が行われ、20-15 Ma 頃に日本海が拡大したとされる。しかし台湾堆積盆地では、地殻の展張が行われたにとどまった。

5-2. 東海斜面堆積盆形成期—古沖縄トラフ—

中新世後期になると、東海斜面堆積盆が沈降し、堆積盆が形成される。これは、堆積盆の幅および深さが、たとえば、北部では台湾堆積盆に匹敵するところから、独立した一つのトラフ形成運動が行われたとみなせる。また別な見方をすれば、これは、現在の狭義の沖縄トラフ中央部が隆起した際の縁辺の沈降帯であるとの考えもできる。特に、南部の断面ではそうである。しかし、南北通じて、沖縄トラフの東側にそれに匹敵するだけの沈降域が認められず、沖縄トラフの東西両側に対称的に沈降帯が存在していないところから、陸棚前縁堆積盆は一つの独立したものとみられる。ここには、後期中新世以降の堆積物が5 Km 以上の厚さで堆積している。主体は鮮新世の地層である。これは、大沖縄トラフの西側に含まれていて、いわゆる古沖縄トラフとみなすべきものであろう。広くとれば、台湾堆積盆も古沖縄トラフに入るが、さしあたってここでは、この東海斜面堆積盆までを古沖縄トラフに含めておく。

沖縄トラフから周辺にかけて中期中新世から後期中新世にかけての不整合が発達している。これは東海大陸棚から島弧にかけて広域に認められる。この不整合形成期に削られた堆積物が、この陸棚前縁堆積盆を埋積したであろう。九州北部では、後期中新世から鮮新世に火成活動が行われているが、これは、この期の堆積盆形成の断層運動と密接に関係があらう。後期中新世から更新世初期の地層は一部を除いては、1-2Km の厚さで現在のトラフ域から琉球弧および海溝斜面を被覆した (Figs. 2, 3)。これが島尻層群（海域のC層相当層）とされる地層である。そして、この地層が断層および褶曲変形して現在の沖縄トラフが形成されている。すなわち島尻層群は沖縄トラフの基盤層の一部となっている。したがって、この時期には狭義の沖縄トラフ (3)、いわゆる新沖縄トラフはなかった。

この期には日本海では、日本海盆や大和海盆はすでに存在し、この時代に相当する地層はそこでは海盆を埋積する地層であった。

5-3. 沖縄トラフ形成期—新沖縄トラフ—

更新世初期に新沖縄トラフ域の断層運動と一部の陥没が起こった。周辺陸域のこの期の地層中に、頻繁に不整合が認められる。海底の音波記録によって区分される層は、大きなイベントの境目、すなわち陸上での不整合形成期にあたる時期にたまったものが一まとまりとなっているといえる。例えば、B₃層は、島尻層群と知念砂岩層との間の後期更新世の不整合形成期、B₂層は知念砂岩層と那覇石灰岩層との間の初期更新世の不整合形成期に堆積したものであろう。B₁層は、琉球層群と完新統との間の不整合形成期に主に堆積したものであろう。すなわち、それらは、不整合期に削られた土砂が水底にたまったものが主なものといえる。

以上を整理すると、まず、最初にトラフの中軸部や琉球海嶺西縁のリフト域が陥没し、ここには非海成層がたまった。おそらく大きな湖が点々と連なっていたのであろう。多分、瀬戸内海の北東に陸を介して琵琶湖があるといった状景と類似したものであろう。時代がたち、もう少し地溝形成がすすむと、沖縄トラフの中軸に点々としていた水溜りどうしがつながって一つの水系となる。それは台湾のすぐ北から発し、より北方のトカラ海峡から東のフィリピン海へ流出する一つの大きな河系を形成していたことになる (木村, 1985の図60-(1))。これは、諸喜田茂光 (1989, 私信) の指摘でもある。沖縄トラフ底に非海成堆積層があるかどうか、ボーリングで確かめたいところである。ただし、これは、トカラ海峡から沖縄トラフ内に海水が進入することをも意味する。この期には台湾を経て大陸から連なる陸橋ができていた。そして、これはトカラ海峡で切れていた。ハブの分布がトカラ列島より北にはみられないというのは、ハブがこの期に琉球列島に渡ってきたからと思われる。これが、200万年から100万年前ころの話である。

後期更新世に削られた土砂がトラフ底に一樣にたまったものが B₁層であろう。その時期には、琉球弧が陸に姿を現し、最後の陸橋を形成した可能性がある (木村, 1985)。その後、その浸食面上に沖積層 (A層) が堆積した。音波探査記録 (3.5KHz 地層探査記録を含む) で識別されるほどの、厚さ数m以上の堆積物の分布は海底では限られている。すなわち、沖縄トラフの中軸谷中にタービダイトとして運ばれたものと、島弧の周りの海岸から10km 程度までの陸棚上に認められるものが主なものである。

6. 議 論

沖縄トラフ形成に関しては、①中新世後期に大沖縄ト

ラフの西縁付近でトラフ状の堆積盆が形成された。この古沖縄トラフの形成が、いわゆる沖縄トラフの初期とすれば、沖縄トラフの形成は後期中新世からということになる。②更新世初期に断裂運動に伴い、現在に通じる新沖縄トラフ形成が行われた。従って、狭義の沖縄トラフに限定すれば、沖縄トラフの形成は初期更新世ということになる。そして、沖縄トラフを中心として浅い水域ができた。③更新世中期から中央地溝の活動が活発化し、それと同時に、トラフ底の深海化が行われた。その結果、現在の大沖縄トラフ全般にわたる大陥没となった。

以上のプロセスをマグマ活動との関係でみるとどうか。これは、マグマ上昇で、一度隆起した地表が、マグマが地表に噴出するとともに、地下の封圧が減じたために沈下に移った現象ととれる。ここで問題は、琉球弧を含めて、陥没の中心イコール傾動隆起の中心となっていて、それが沖縄トラフ中軸にあたるということである。すなわち、大沖縄トラフの幅全体にわたって断裂形成を起こしたマグマ上昇の中心点は新沖縄トラフの中央地溝にあたる。火山フロントの火山は、それとは別にベニオフゾーンの深さが100km 前後の地表付近に発生している。これは、沖縄トラフとは関係ない島弧でも普遍的に認められる現象である。したがって、トラフ形成のマグマ活動とは一応切り離して考えられる。ただ、これもトカラ帯という大沖縄トラフの rifted margin に沿って火山活動が行われていること、火山フロントの噴火活動が盛んな所の背弧では火山活動が不活発で、背弧で活動が活発であるフロントでは火山活動が不活発という対応がみられることから、現在は、背弧のマグマとフロントのマグマとは深部では関係があるかもしれない。

以上より、沖縄トラフを第四紀の地溝・活断層および活火山の存在する帯域に沿って発達した第四紀の堆積盆という見方ができる。その見方からすると、活動的な構造線および堆積盆の南方延長は台湾のイラン平野 (Fig. 1 の I) に連なる。また、沖縄トラフの北方延長の堆積盆は九州の口之津付近から別府—島原地溝 (松本, 1979) を経て瀬戸内低地帯、大阪平野そして琵琶湖といった第四紀の堆積盆を指向している。活動的なリフトは中央構造線に引き継がれる。琵琶湖周辺には活断層群が存在する。その北方延長には白山火山等の火山群を経て富山低地帯に至り、さらに日本海の最上トラフへ抜けるリフト帯が予想される。ともあれ、既述の限定条件でみると、沖縄トラフを含めて西南日本の内帯にある第四紀堆積盆はこのようにつながる。この一連の低地帯は、リフト帯ともいえ、プレートを断ち切っているかもしれない。一方、中央日本には「中央日本断層」(木村,

1978; KIMURA, 1981) という大断層がある。概略中央日本断層付近をプレートの境界とみなすと (中村, 1984; 小林, 1984), その意味では、中央日本断層より西方は一つの小板プレートとなる (西南小プレート; 木村, 1989)。

既述の内帯の堆積盆列と対応するように、背弧あるいは弧内堆積盆の外帯側に堆積盆列が認められる。大洋側に、東から東京湾、伊勢湾、紀伊水道、土佐湾、日向灘といった低地がある。この外縁の堆積盆の特徴は新生代堆積盆としての性格を遺伝していることである。これは、東京湾の場合は相模トラフに沿った南関東の右側方移動により、西南日本外帯の各低地はフィリピン海プレートの斜めもぐりこみによる西南日本外帯 (西南小プレート) の左側方移動の影響によると思われる。そして、琉球列島の地形の凹凸がかなり規則的に配列しているのも、西南日本外帯の移動につれ、西南小プレートが変形・褶曲して形成されたものであろう。その表面では、一部展張の場が生じて正断層が発生している。

ここで、プレートテクトニクス的には、沖縄トラフ—最上トラフの東側は北米プレートに属す可能性もでてくる。西南小プレートが、ユーラシアプレートに属するのにかそれとも北米プレートに属するののかといった問題を含めて、今後の検討が重要となろう。この点が明らかになると、背弧海盆あるいは凹地が能動的に開くのかそれとも受動的に開くのか、あるいはどうして開かない場合と開く場合とがあるのかといった問題もより明らかになると思える。

7. 結 論

1) 現在に通じる沖縄トラフ (新沖縄トラフ) は、第四紀更新世初期の 2-1.5 Ma のいつかより大陸縁辺に形成された大グラーベンである。沖縄トラフ下に、大陸性地殻が認められ、海底拡大には至っていない。

2) しかし、沖縄トラフの東側に、後期中新世—鮮新世に形成されたトラフが埋積されている (古沖縄トラフ)。広義の沖縄トラフすなわち大沖縄トラフはこの両トラフを含んでいる。この点からは、沖縄トラフの形成は後期中新世に始まったともいえる。

3) 沖縄トラフの大陥没 (深海化) は、中期更新世以降、中央地溝の火成活動を伴いながら急速に進行した。これは、大沖縄トラフ全体にわたって行われた。

4) 地溝運動により形成され、しかも長大な沖縄トラフと同様な堆積盆は、さらに西方の東海大陸棚下にも存在する。すなわち、大局的には、西方から東方へ、台湾堆積盆 (後期白亜紀—中期中新世)、東海斜面堆積盆 (後期中新世—初期更新世)、沖縄トラフ (初期更新世—現

世)と配列する3つのトラフ状堆積盆地が認められる。

5) それら堆積盆の形成は、新生代に東方へ移動してきた。そして、最新のトラフが沖縄トラフとみなせる。

文 献

- 相場惇一・関谷英一, 1979: 南西諸島周辺海域の堆積盆の分布と性格. 石油技術協会誌, 44, 329-340.
- DELP88 航海・地震探査グループ, 1989: 沖縄トラフ南西部地域における地震波速度構造. 地震学会講演予稿集, no. 1, 192.
- 古川雅英・北原康夫・伊勢崎修弘, 1989: 地磁気異常解析からみた沖縄トラフの中軸部—伊平屋海凹—. 月刊地球, 11, 604-611.
- HALBACH, P., NAKAMURA, K., WAHSNER, M., LANGE, J., SAKAI, H., KASELITZ, L., HANSEN, R., YAMANO, M., POST, J., PRAUSE, B., SEIFERT, R., MICHAELIS, W., TEICHMANN, M., KINOSHITA, M., MÄRTEN, A., ISHIBASHI, J., CRERWINSKI, S. and BLUM, N., 1989: Probable modern analogue of Kuroko-type massive sulphide deposits in the Okinawa Trough back-arc basin. *Nature*, 338, 496-499.
- HERMAN, B., ROGER, M., ANDERSON, N. and TRUCHAN, M., 1978: Extensional tectonics in the Okinawa Trough. *Geological Investigation of Continental Margins, AAPG Mem.*, 29, 199-208.
- 本間弘次・日下部実・加賀美寛雄・飯島 滋・酒井 均・児玉幸雄・木村政昭, 1987: 「しんかい2000」による沖縄トラフの岩石の主化学・微量元素組成, D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比. 海洋科学技術センター試験研報, 197-211.
- ISHIKAWA, M., SATO, H., KIMURA, M., KINOSHITA, H., 1989: Petrographic study recovered from the Okinawa Trough during the DELP 1988 Cruise. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo* (in press).
- 桂 忠彦・大島章一・荻野卓司・池田 清・永野真男・内田摩利夫・林田正和・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. 水路部研報, no. 21, 21-45.
- 木村政昭・広島俊男・井上英二, 1975: 東シナ海の地質構造. 月刊海洋科学, 7, 45-51.
- , 1978: 噴火と大地震. 東大出版会(東京), 187p.
- KIMURA, M., 1981: A new view of the Fossa Magna in central Japan. *Bull. Univ. Ryukyus*, no. 31, 55-60.
- 木村政昭, 1983a: 沖縄トラフの陥没構造形成に関する考察. 地質学論集, no. 22, 141-157.
- , 1983b: 琉球弧及び周辺海底地形図, 1:1, 180,000. 沖縄大百科事典付図, 沖縄タイムス社.
- , 1985: 地震と地殻変動. 195p., 九大出版会, 福岡.
- , 伊勢崎修弘・古川雅英・石原丈実, 1985: 沖縄トラフ中部の地磁気異常. 地学雑誌, 94, 16-29.
- KIMURA, M., 1985: Back-arc rifting in the Okinawa Trough. *Mar. Petroleum Geol.*, 2, 222-240.
- , KANEOKA, I., KATO, Y., YAMAMOTO, S., KUSHIRO, I., TOKUYAMA, H., KINOSHITA, H., ISEZAKI, N., MASAKI, H., OSHIDA, A., UYEDA, S. and HILDE, T. W. C., 1986: Report on DELP 1984 Cruises in the middle Okinawa Trough. Part V: Topography and geology of the central grabens and their vicinity. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 61, 269-310.
- 木村政昭・安藤雅孝・許 正憲・田中武男・仲 二郎・大森 保・伊沢英二・加藤祐三, 1988: 中部沖縄トラフ熱水域の地形・鉱床・生物. 第5回「しんかい2000」研究シンポジウム予稿集, 72-82.
- KIMURA, M., UYEDA, S., KATO, Y., TANAKA, T., YAMANO, M., GAMO, T., SAKAI, H., KATO, S., IZAWA, E. and OOMORI, T., 1988: Active hydrothermal mounds in the Okinawa Trough back-arc basin, Japan. *Tectonophysics*, 145, 319-324.
- 木村政昭, 1989: 琉球弧の海底地質学的展望. 月刊地球, 11, 576-584.
- , 田中武男・許 正憲・安藤雅孝・大森 保・伊沢英二・嘉川郁朗, 1989: 「しんかい2000」による沖縄トラフ中部熱水域の地形・鉱床・生物の観察. 海洋科学センター試験研報, 223-244.
- KIMURA, M., FURUKAWA, M., IZAWA, E., ISHIKAWA, M., YAMADA, S., KATO, Y., KINOSHITA, H., TSUGARU, R., 1989: Geology and geological structure of the middle to southern Okinawa Trough. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo* (in press).
- 小林洋二, 1984: プレート境界で発生する大地震の時空分布. 月刊地球, 6, 9-10.
- LEE, C., SHOR, G., BIBEE, L. D., Lu, R. S. and HILDE, T. W. C., 1980: Okinawa Trough: Origin of the back-arc basin. *Mar. Geol.*, 35, 219-241.
- 松本徑夫, 1979: 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. 地質学論集, 16, 127-139.
- NAGUMO, S., KINOSHITA, H., KASAHARA, J., OUCHI, T., TOKUYAMA, H., ASANUMA, T., KORESAWA, S., and AKIYOSHI, H., 1986: Report on DELP 1984 Cruises in

- the middle Okinawa Trough, Part II : Seismic structural studies. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **61**, 167-202.
- 中川久夫, 1988 : 南関東第三紀・第四紀境界付近のでき事. *月刊地球*, **10**, 544-550.
- 中村一明, 1984 : 日本海・フォッサマグナプレート収束境界考. *月刊地球*, **6**, 25-28.
- 中村光一・岩渕 洋・金子康江, 1987 : 沖縄トラフ伊是名海穴の海底地質調査. 第4回「しんかい2000」研究シンポジウム予稿集, 5-6.
- ・浦辺徹郎・丸茂克美・青木正博・金沢康夫, 1988 : 沖縄トラフ伊是名海穴の海底熱水鉱床について. 第5回「しんかい2000」研究シンポジウム予稿集, 67-70.
- 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. 水路部研報, no. 24, 19-43.
- SIBUET, J. C., LETOUZEY, J., BARBIER, F., FOUCHER, J-P., HILDE, T. W. C., KIMURA, M., LING-YUN, C., MARSS-ET, B., MULLER, C. and STEPHAN, J. -F., 1987 : Back-arc extension in the Okinawa Trough. *J. Geophys. Res.*, **92**, 14041-14063.
- 棚原 朗・平良初男・真喜志康弘・津覇ゆう子・木村政昭, 1989 : 沖縄トラフ沖城底質の堆積速度と成分分布. *Bull. Univ. Ryukyus*, no. 48, 1-10.
- 氏家 宏, 1989 : 陸域地質の実証的再検討による琉球弧の地史. *月刊地球*, **11**, 631-640.
- WAGEMAN, J. M., HILDE, T. W. C., and EMERY, K. O., 1970 : Structural framework of East China Sea and Yellow Sea. *AAPG Bull.*, **54**, 1611-1643.
- 杨非宇, 1983 : 中国大陆架地質構造特性. *地質学報*, no. 3, 254-260.
- 周志武, 殷培齡, 1985 : 東海地質調査的回顧与含油氣远景展望. *石油與天蒸氣地質*, **6**, 2-14.