

地質学論集 第41号 35-42, 1993年6月  
*Mem. Geol. Soc. Japan*, 41, 35-42

## 大分平野と別府湾（深部）

竹村恵二\*・由佐悠紀\*・北岡豪一\*

### Oita Plain and Beppu Bay: Subsurface structure and geological development around Beppu Bay

Keiji TAKEMURA\*, Yuki YUSA\* and Koichi KITAOKA\*

**Abstract** Subsurface structure in Beppu Bay is introduced on the basis of the airgun multichannel seismic reflection survey and gravity measurement. The Beppu Bay Crossing Tectonic Line running in the north-south direction is the main tectonic line in Beppu Bay, and divided into the eastern and the western areas. A graben-like structure is characteristic in the eastern area, and the deepest part reaches to 3,500m below sea level. In the western area, two distinct areas are recognized. The main part indicates an extremely low Bouguer gravity anomaly, and a basin structure. The north part is characterized by listric faulting.

Three active tectonic areas are recognized in the Beppu Bay. First is the north-western area where active listric faulting is developed. Second is the area along the Beppu Bay Crossing Tectonic Line. Third is the northern part of the eastern area where more or less vertical fractures or faults reaching to basement rocks like wrench faults are developed. These are very important for considering the recent tectonic stress condition of this area.

The oldest age of the sediments on the basement rocks distributed to the south of Oita Plain is about 3.0 Ma from the fission-track age determination. If the sedimentation had started in the Beppu Bay region at about 3.0 Ma, sedimentation rate is calculated about 1.2 mm/year.

*Key words:* Beppu Bay, Oita Plain, Subsurface structure, Seismic reflection, Gravity measurement, Fission-track age, Tectonic development

#### はじめに

別府大分地域は九州中部地溝や別府-鳥原地溝（松本, 1979）とよばれる、張力の応力が発達する地域の北東端に位置している。この地域から九州中部地溝地帯の構造発達史を考察することは以下の点で大きな利点を有している。

まずこの地域には南側に佐賀関半島地域の三波川変成岩、北側に国東半島地域の領家花崗岩、変成岩類が新生代の岩石の基盤として露出している（第1図）。中央構造線の延長部が少なくともこの地域までは四国から追跡できる。別府湾は大きな低重力異常を示す地域の中央にあり（駒澤・鎌田, 1985）、堆積物が厚く埋積している

地溝の延長部と考えられ、地震探査や重力探査などの海域での地球物理学的探査が実行できれば、全体の地下構造の把握が可能となる。また、大分平野には沖積平野の後方に丘陵として新生代の地層が広く分布している（首藤, 1953）。別府地域から西方は速見地溝（池田, 1979）、由布-鶴見地溝（星住ほか, 1988）と呼ばれる地溝状地形を呈し、また火山活動の記録が豊富に残されている。別府とともに大分平野でも温泉掘削がさかんに行われ、掘削データや温泉の水質、泉質の分布がよくわかるようになってきている。

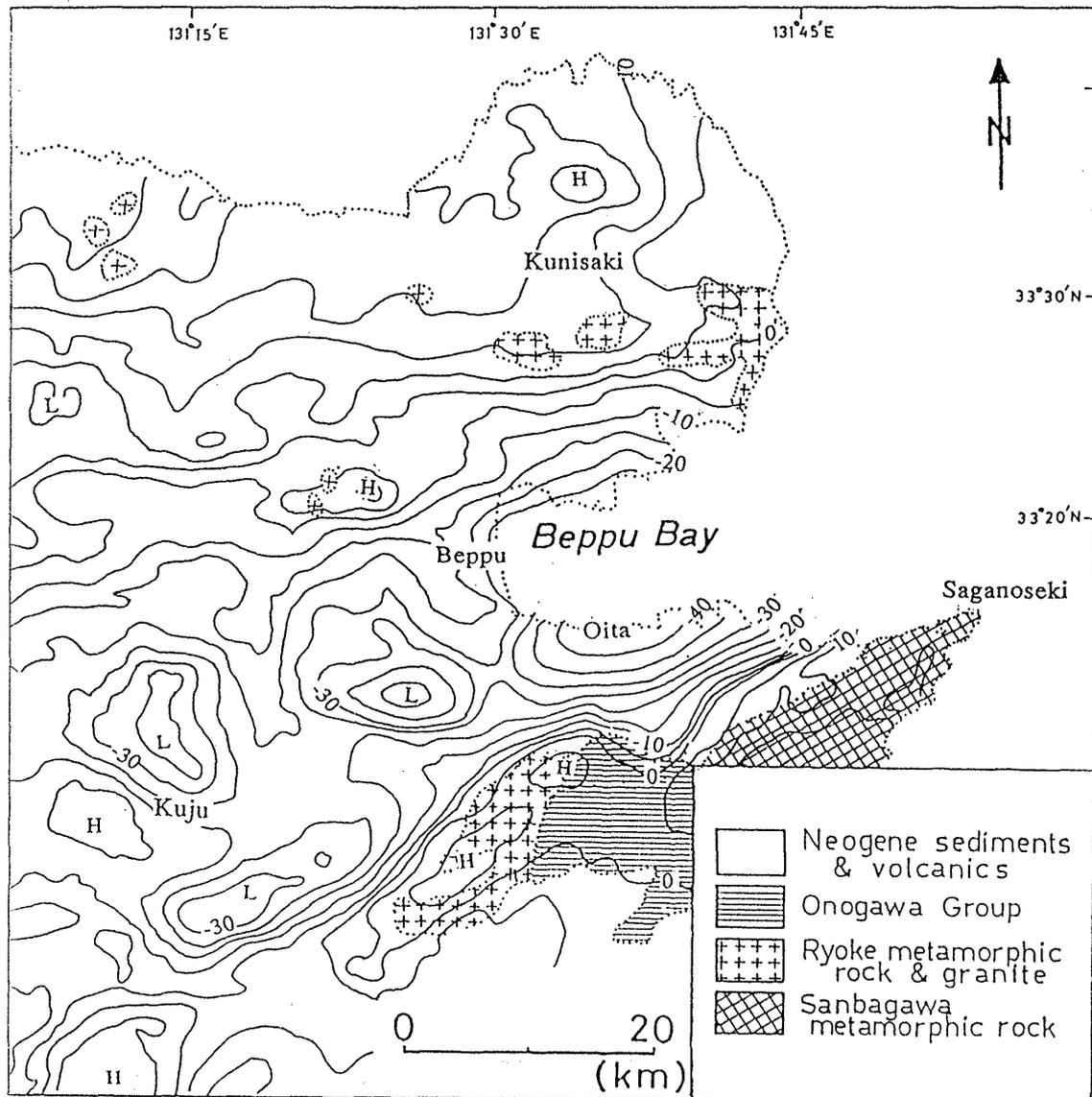
以上のような諸点を考慮に入れて地溝東端地域の最近のデータに基づいて地溝の深部構造および周辺の地質について報告する。

#### 別府湾の地下構造

1989年から1990年にかけて京都大学地球物理学研究施設では別府地域の地熱構造解明の一環として別府湾地域

1992年9月28日受付, 1992年11月9日受理.

\*京都大学理学部附属地球物理学研究施設 Beppu Geophysical Research Laboratory, Faculty of Science, Kyoto University, Beppu 874, Japan



第1図 別府湾周辺の基盤岩分布と重力異常 (単位 mgal) (由佐ほか, 1992). 重力異常図は駒澤・鎌田 (1985) による.

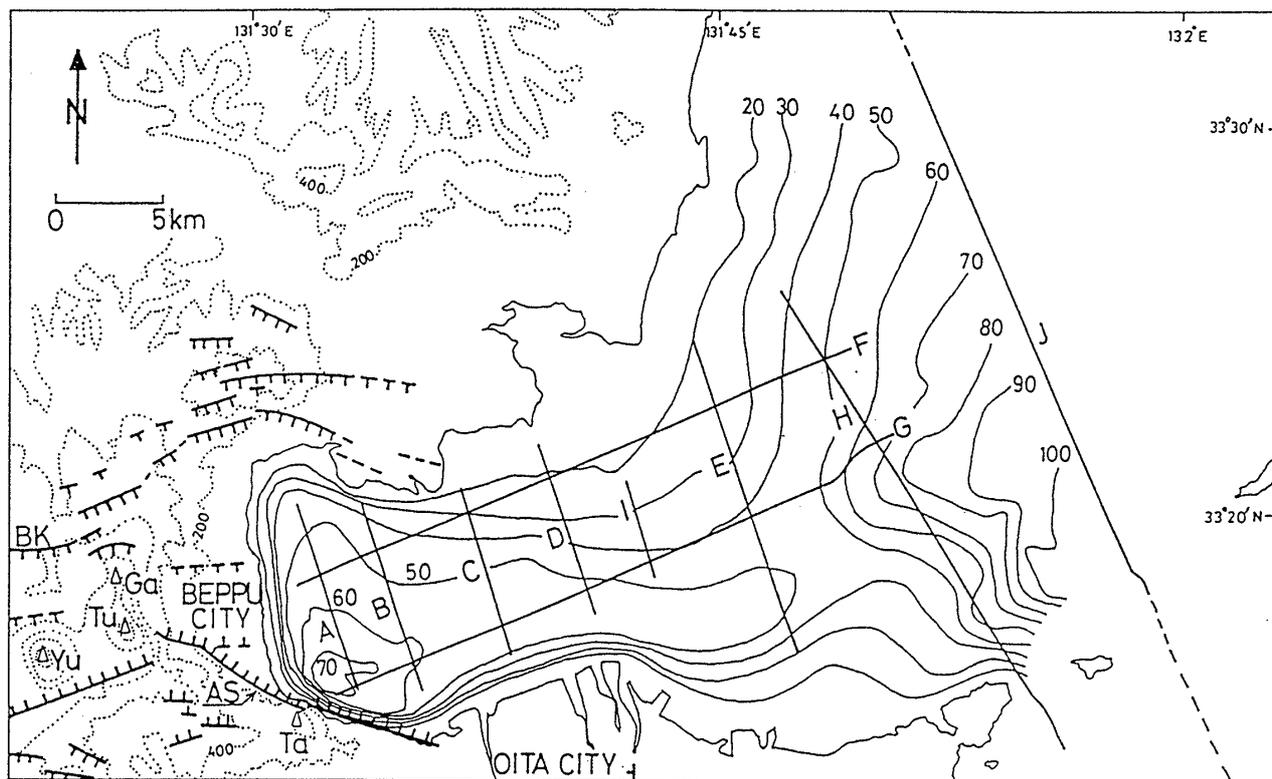
においてマルチチャンネル反射法地震探査と海底重力計による重力調査を実施した (第2図). ここではその結果の一部を由佐ほか (1992) により紹介する.

: 別府湾は地下構造的に, A・B・Cの3ブロックに分けられ, Cブロックと他の2ブロックは明瞭な構造線である別府湾横断構造線 (BB) によって区分される (第3図). この別府湾横断構造線 (BB) の一部は浅層音波探査によって島崎ほか (1990) が命名した<別府湾中央断層>と一致している.

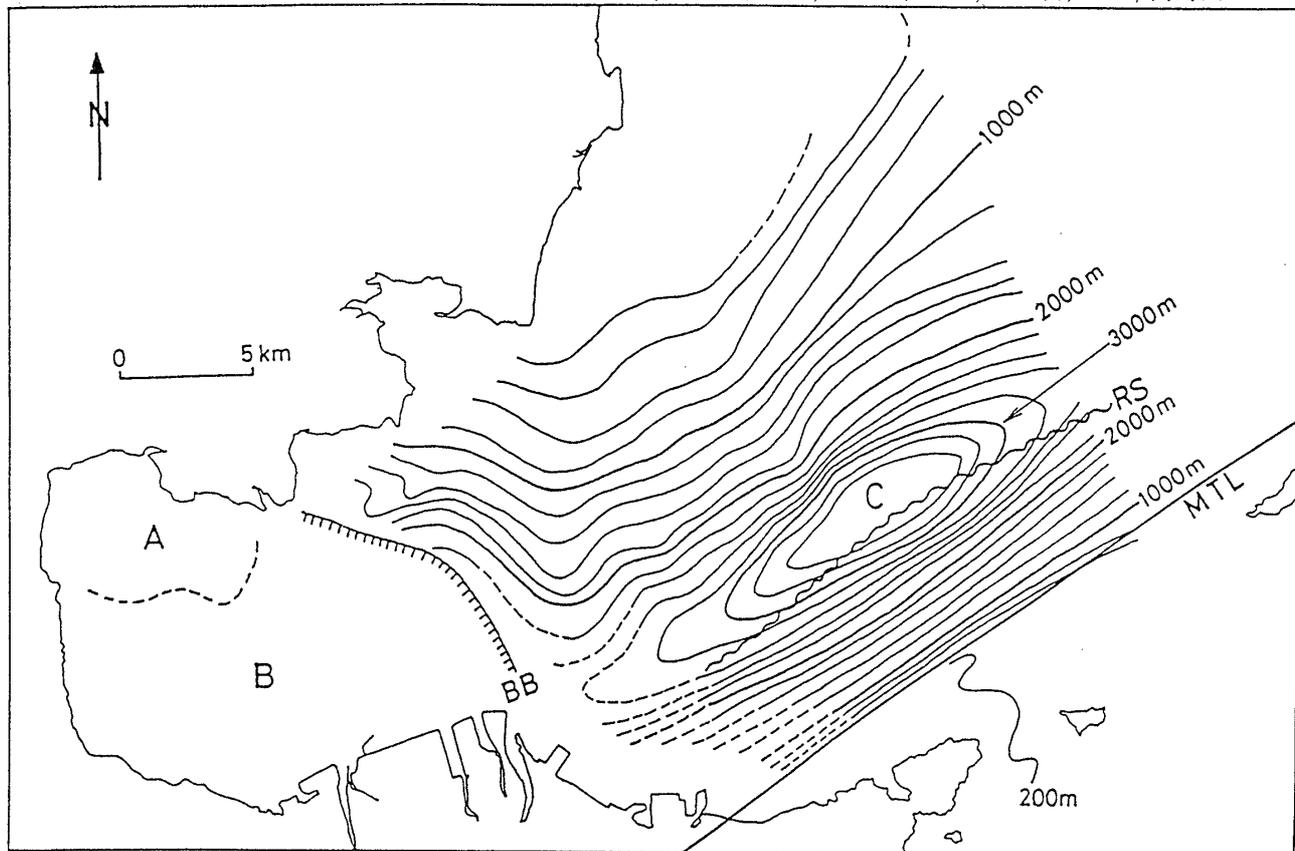
: Cブロックは舟底状の基盤構造が明かな地域で, 埋積する堆積物と基盤との境界の最深部は3,500mに達する (例: H測線, 第4図). 舟底状基盤構造の軸は東北東-西南西で, 四国から推定される中央構造線の方向に

平行である. Bブロックは堆積物で埋積された盆地状構造をなし, 低い重力異常値 (-58mgal) を示す (第5図). Aブロックの浅部堆積層中には対をなして成長するリストラック断層 (断層面が上方に凹の湾曲した正断層) 群が発達する (第6図). このような断層群が発達するという結果は島崎ほか (1986), 森山・日高 (1981), Allis *et al.* (1989) により得られた浅層音波探査の結果と対応し, 断層群は約300mの深度までは明瞭に認められることが明らかになった.

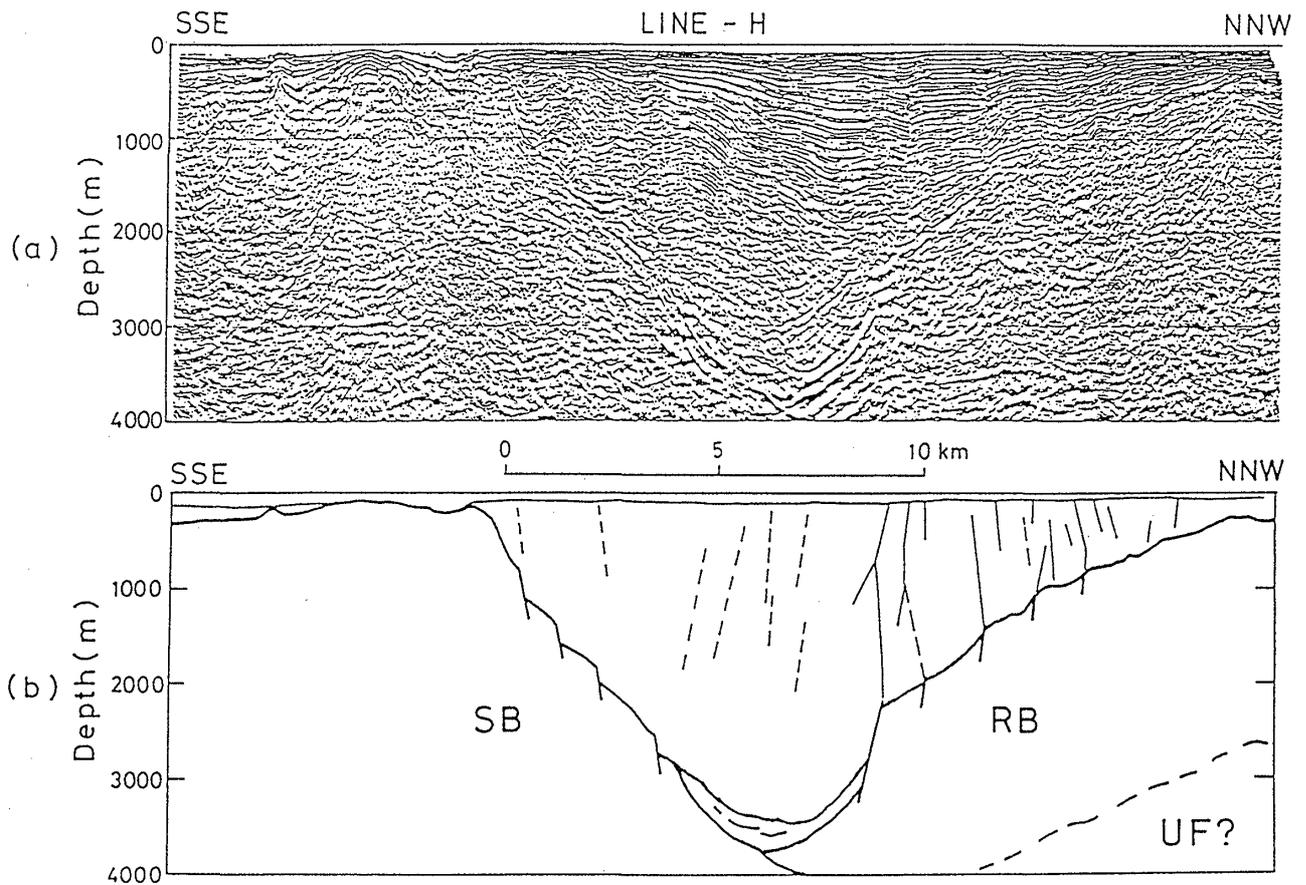
: 舟底状構造の南側斜面は三波川帯基盤からなると考えられ, 傾斜角は浅い部分で30度程度で深くなるにつれ低角となり, 下に凸の形を示す. 対照的に北側斜面を構成する領家帯基盤は上に凸の形状である. 両基盤は地表



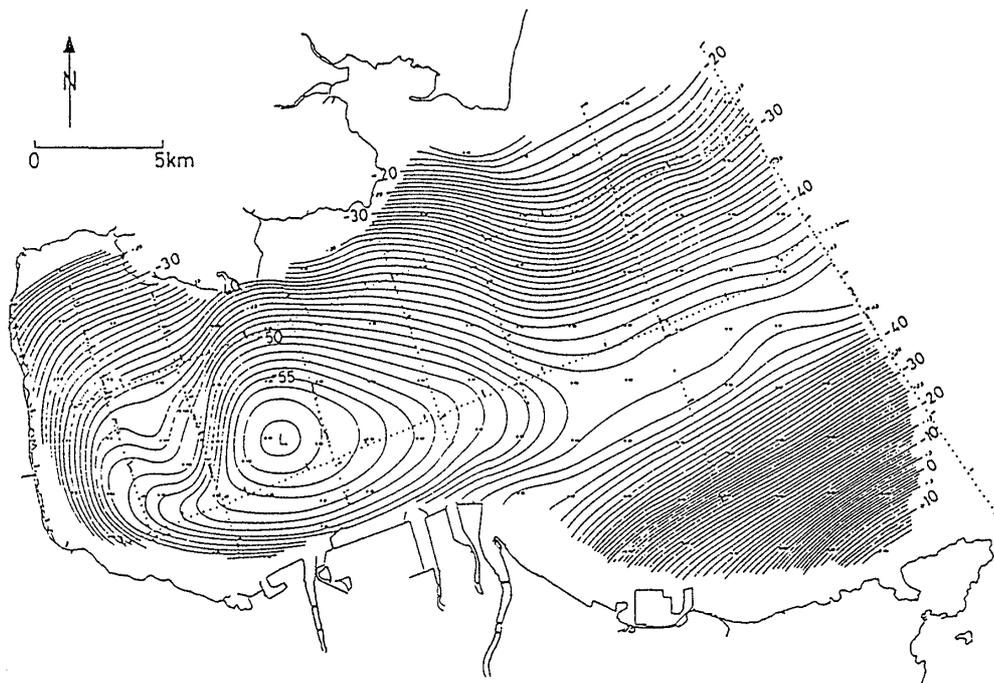
第2図 別府湾における反射法地震探査測線 (由佐ほか, 1992). 海底地形のコンターは10m, 陸域の地形コンターは200m. A S ; 朝見川断層, B K ; 別府北断層, Yu ; 由布岳, Tu ; 鶴見岳, Ga ; 伽藍岳, Ta ; 高崎山



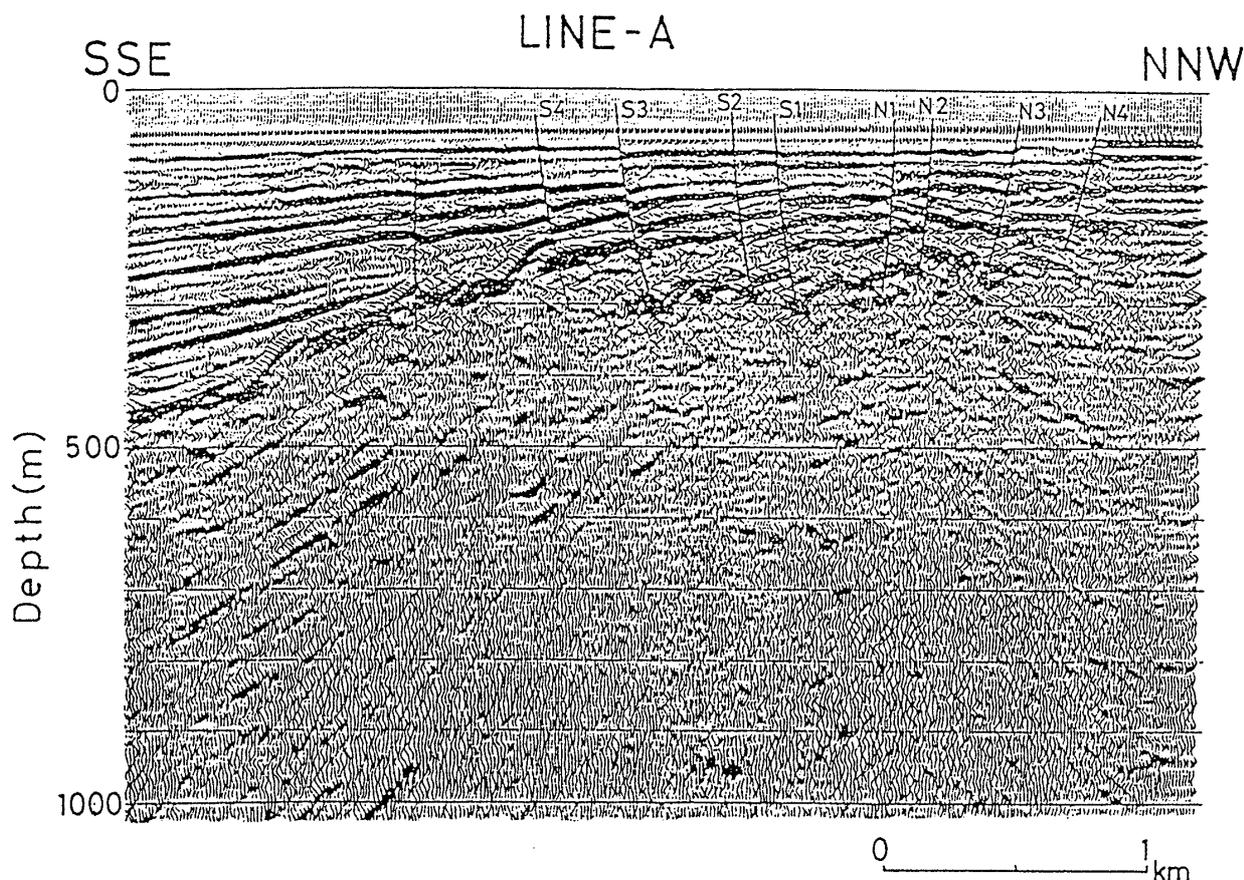
第3図 反射法地震探査による基盤深度および別府湾の構造区分 (由佐ほか, 1992). 等高線は基盤深度 (m) をあらわす. MTL ; 中央構造線, BB ; 別府湾横断構造線, RS ; 領家帯基盤の北限



第4図 Cブロックでの地震探査結果；測線H（由佐ほか，1992）。細かい実線と破線は断層や断裂を示す。SB；三波川帯基盤，RB；領家帯基盤，UF？；未知のユニット



第5図 別府湾における海底重力測定によるブーゲー重力異常（由佐ほか，1992）。コンター間隔は1mgal，仮定密度は2.00g/cm<sup>3</sup>。



第6図 Aブロックに発達するリトリック断層群（測線Aの一部）（由佐ほか，1992）。

面における中央構造線の別府湾内への延長を約7km北に平行移動した位置（第3図のRS）で会する。

：Cブロックの北部域では南側基盤（三波川帯側）が北側基盤（領家帯側）の下位に位置し、その面は北に向い水平に近くなる（第4図）。

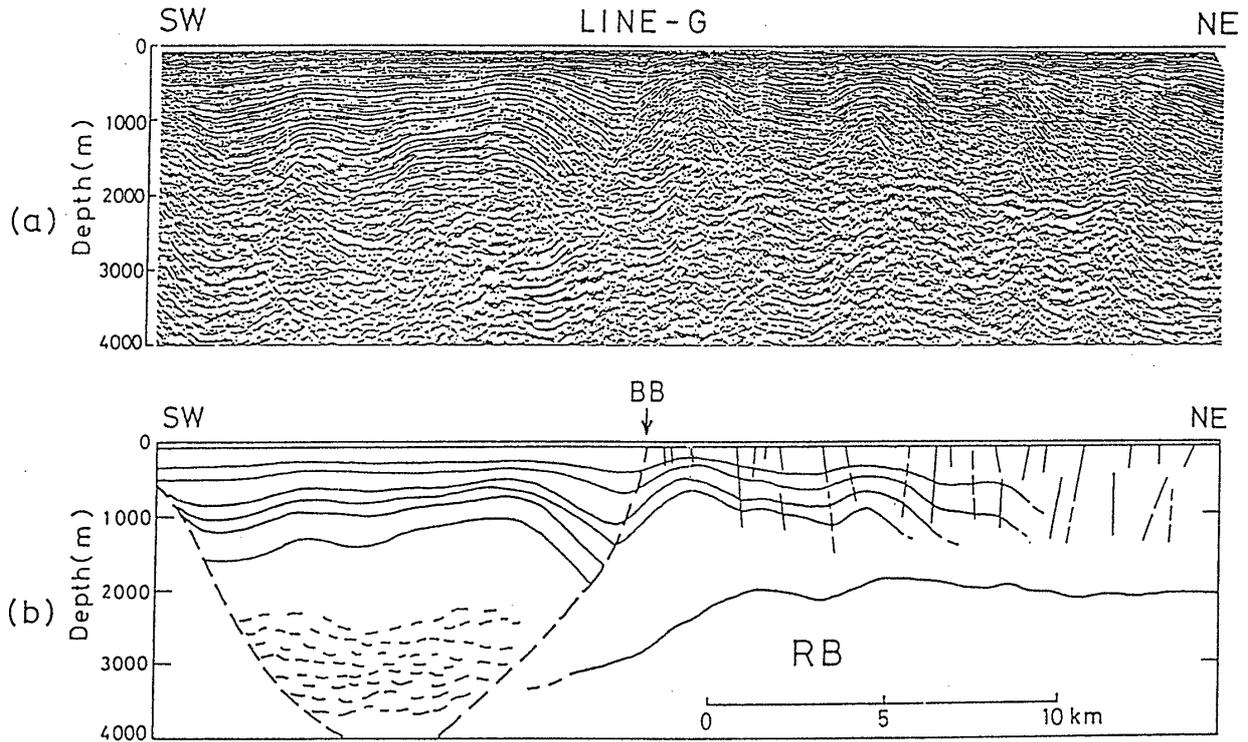
：北側基盤の上位の堆積層中に断層（断裂）の発達が著しく、対照的に南側基盤の上位の堆積層中ではまれである（第4図）。

：Cブロック東部の堆積層中に北東－南西方向の圧縮を示唆する褶曲構造が発達し、振幅は深部ほど大きく、基盤岩の凹凸とは無関係である（第7図）。

#### 大分平野の新生代層の年代

別府湾の構造を周辺陸域の地質や構造と関連付けることはこの地域の構造発達史を考察する上で重要となる。大分平野南方には高度100－150mの後期新生代層からなる丘陵が広く分布している。この地層は豊州累層群（下位の碩南層群，上位の大分層群）と名付けられている（首藤，1953）。岡口（1976）はこの新生代層中の火砕流のフィッシュン・トラック年代測定を試み、 $6.52 \pm 1.34$

Ma（敷戸火砕流）， $1.44 \pm 0.22$ Ma（羽田火砕流）の年代がえられた。竹村ほか（1988）は岡口（1976）の層準も含む大分平野南部丘陵から9個の試料を得て、 $S2 \pi E S \cdot 12 \pi ES \cdot ED$ 法（Suzuki，1984）を用いるフィッシュン・トラック法により測定した。その結果，第1表に示されるように2.9Maから0.6Maの範囲の年代値が得られた。この結果はこの地域の新生代層の最下位の層準でも3Maをこえることがなく，碩南層群と大分層群の不整合の時間間隙は最大でも古堂原火山灰層の年代（ $1.1 \pm 0.3$ Ma）と羽田火砕流の年代（ $0.68 \pm 0.18$ Ma）から約40万年程度と見積られる。最近，このうちの3試料（敷戸火砕流，古堂原火山灰，羽田火砕流）についてIUGSの地質年代学サブコミッションから出されたフィッシュン・トラック年代測定の標準化勧告（Hurford，1990a,b）により再測定を試みた。その結果敷戸火砕流が $1.5 \pm 0.3$ Ma，古堂原火山灰が $1.1 \pm 0.2$ Ma，羽田火砕流が $0.69 \pm 0.12$ Maの値が得られ（竹村・檀原，未公表），竹村ほか（1988）のデータと整合的であった。



第7図 BブロックとCブロックを横切る測線Gの地震探査結果 (由佐ほか, 1992)

第1表 大分平野南方の後期新生代層のフィッシュン・トラック年代測定結果 (竹村ほか, 1988).

試料名	鉱物名	自発核分裂飛跡		誘導核分裂飛跡		熱中性子フルエンス		年代値		誤差	結晶数	相関係数	総計数面積	ウラン濃度		
		総数 $\Sigma N_s$ (t)	密度 $\rho_s$ $= \Sigma N_s / \Sigma S$ (t/cm <sup>2</sup> )	総数 $\Sigma N_i$ $= \Sigma N_i / \Sigma S$ (t)	密度 $\rho_i$ $= \Sigma N_i / \Sigma S$ (t/cm <sup>2</sup> )	総数 $\Sigma \Phi$ (n)	(※1) 熱中性子線量 $\rho_d$ (n/cm <sup>2</sup> )	$\Phi_{th}$ (n/cm <sup>2</sup> )	T (Ma)						$\pm e-T$ (Ma)	
下部互層	OT-6	Zircon	7	$9.91 \times 10^3$	383	$5.14 \times 10^5$	1232	$8.31 \times 10^4$	$5.18 \times 10^4$	0.60	0.23	33.3	28	0.289	$7.06 \times 10^4$	50
羽田火砕岩層	OT-7	Zircon	14	$7.87 \times 10^3$	639	$3.59 \times 10^5$	1232	$8.31 \times 10^4$	$5.18 \times 10^4$	0.68	0.18	27.2	36	0.586	$1.78 \times 10^3$	35
古堂原火山灰層	OT-9	Zircon	10	$9.85 \times 10^3$	295	$2.64 \times 10^5$	1232	$8.31 \times 10^4$	$5.18 \times 10^4$	1.1	0.3	32.3	35	0.437	$1.12 \times 10^3$	25
飯戸火砕岩層(降下軽石)	OT-3	Zircon	17	$9.61 \times 10^3$	401	$2.27 \times 10^5$	1232	$8.31 \times 10^4$	$5.18 \times 10^4$	1.3	0.3	24.9	36	-0.063	$1.77 \times 10^3$	22
光吉層	OT-2	Zircon	29	$1.91 \times 10^4$	399	$2.62 \times 10^5$	1232	$8.31 \times 10^4$	$5.18 \times 10^4$	2.2	0.4	19.4	36	-0.225	$1.52 \times 10^3$	25
	OT-4	Zircon	33	$2.71 \times 10^4$	379	$3.11 \times 10^5$	1232	$8.31 \times 10^4$	$5.18 \times 10^4$	2.7	0.5	18.4	36	0.783	$1.22 \times 10^3$	30
判田層	OT-10	Zircon	9	$2.86 \times 10^4$	127	$4.04 \times 10^5$	1232	$8.31 \times 10^4$	$5.18 \times 10^4$	2.2	0.8	34.6	14	0.758	$3.15 \times 10^4$	39
	OT-13	Zircon	9	$4.07 \times 10^4$	115	$5.19 \times 10^5$	1232	$8.31 \times 10^4$	$5.18 \times 10^4$	2.4	0.8	34.7	12	0.786	$2.21 \times 10^4$	50
	OT-11	Zircon	23	$3.44 \times 10^4$	247	$3.70 \times 10^5$	1232	$8.31 \times 10^4$	$5.18 \times 10^4$	2.9	0.6	22.0	26	0.418	$6.68 \times 10^4$	36

- ※ 1.  $\rho_d$  : 標準ガラスの誘導核分裂トラック密度 (n/cm<sup>2</sup>)
- ※ 2. 年代値  $T = 5.96 \times 10^8 \times \Phi_{th} \times \Sigma N_s / \Sigma N_i = \xi \times \rho_s \times \rho_d / \rho_i$
- ※ 3. 誤差  $e = \{(1/\sqrt{\Sigma N_s})^2 + (1/\sqrt{\Sigma N_i})^2 + (1/\sqrt{\Sigma \Phi})^2\}^{1/2} \times 100$  (%)
- ※ 4. r : 結晶ごとの自発・誘導トラック密度 ( $\rho_s, \rho_i$ ) の相関係数
- ※ 5. ウラン濃度  $U = 5 \times 10^8 \times \rho_i / \Phi_{th}$  (但し、ジルコン結晶中でエッチングされる最大飛跡長を12 $\mu$ mと仮定する)

熱中性子線量測定用標準ガラス : NBS SRM612  
<sup>238</sup>Uの自発核分裂壊変定数 :  $\lambda_f = 7.03 \times 10^{-17}$  (1/yr)  
 熱中性子のUに対する核分裂反応断面積 :  $\sigma_f = 577 \times 10^{-28}$  (cm<sup>2</sup>)  
<sup>238</sup>Uの<sup>235</sup>Uに対する同位体比 :  $I = 7.253 \times 10^{-3}$  (<sup>238</sup>U/<sup>235</sup>U)  
 B値 :  $B = 6.23 \times 10^9$  ( $\Phi_{th} = B \times \rho_d$ )  
 $\xi$  (zeta値) : Calibration factor  
 $\xi = \Phi_{th} \times \sigma_f \times I / \rho_d \times \lambda_f = B \times \sigma_f \times I / \lambda_f = 371$

別府湾周辺地域の地質構造発達と今後の課題

別府湾の地下構造調査から由佐ほか (1992) は以下の指摘を行った。別府湾東部海域においては南側の三波川帯基盤は下に凸で、北側の領家帯基盤は上に凸であり、“Reverse-Drage Flexure” (Hamblin, 1965) と類似である。また、測線G (別府湾東西測線) (第7図) の東部にみられる深部ほど振幅が大きい褶曲構造から、基盤の水平運動により上部の堆積層中にシアが生じ、水平方向に圧縮力が作用したと考えられた。この2つの運動を総合して、三波川帯基盤の斜面に沿って、領家帯

基盤が相対的に右方向 (北東方向) に動きながら下方に滑り落ちていると考えられた。

地質構造発達を考える上で、現在確認される構造の解釈と時間的推移を明らかにしていくことが重要な課題である。由佐ほか (1992) で説明された構造形成のプロセスは別府湾形成に関する全体的な考え方であり、形成の順序や周辺地域の構造発達史との関連についてはふれられていない。これらの検討も含めて九州中部地溝地域の発達史を考察する必要がある、いくつかの点を今後の課題として指摘したい。

別府湾の地下構造のデータから別府湾の現在も活動的

な場所は3箇所指摘できる。第一はAブロックのリストリック断層が明瞭にみとめられる地域(第6図)。第二は別府湾横断構造線に沿う地域である。この断面の測線(測線G:第7図)からは相対的にこの構造線の左側(西側)が滑り落ちた構造が認められる。第三は東部海域でみられる基盤まで届く高角の断裂地域である(第4図)。これは別府湾の東部から豊後水道域まで広い範囲で観察され、中央構造線の運動と関連した WRENCH FAULTである可能性が考えられる。これらの活動的な3箇所のより統一的な解釈が広域的な応力をふまえて必要とされる。

別府湾に堆積している地層と年代に関しては現在のところ不明である。もし現在別府湾周辺域にみられる地層が分布しているとすれば、そのもっとも古い年代でも前述のとおり300万年前より若いと考えられる。この地層の堆積と別府湾東部にみられる舟底状盆地の形成が同時期であれば、堆積速度は1.2mm/年より大きくなる。

この別府湾を中心とした地域の構造発達史の考察には上記の別府湾の地下構造の資料や年代資料とともに、(1)基盤岩に不整合に重なる碩南層群下部(判田層)は右横ずれ断層運動を伴って形成されはじめたとされる(吉岡, 1992)こと、(2)約100万年前頃と推定される碩南層群と大分層群の不整合の形成時期と不整合の形態、(3)大規模火砕流(敷戸, 耶馬溪, 今市, 羽田火砕流など)の活動時期や規模・噴出源、(4)大分平野の地下構造との関連などの研究が必要とされる。

#### 謝 辞

この報告は京都大学地球物理学研究施設の事業の資料による部分が多い。この別府湾地下構造探査にあたって協力いただいた関係諸機関に対して深く感謝する。日本地質学会第99年大会シンポジウム(熊本)では、会員の皆様からの議論をいただいた。石油公団伊藤康人氏には活動的な地域の解釈について有意義な議論をいただいた。記して謝意を表す。

#### 文 献

- Allis, R.G., Yusa, Y. and Taishi, H., 1989, Gas in Beppu Bay inferred from acoustic reflection anomalies. *The Quaternary Research*, **28**, 185-197.
- Hamblin, W.K., 1965, Origin of "Reverse Drag" on the downthrown side of normal faults. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **76**, 1145-1164.
- 星住英夫・小野晃司・三村弘二・野田徹郎, 1988, 別府地域の地質(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 131p.
- Hurford, A.J., 1990a, Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I.U.G.S. Subcommittee of Geochronology. *Chem. Geol.*, **80**, 171-178.
- Hurford, A.J., 1990b, International Union of Geological Sciences Subcommittee on Geochronology recommendation for the standardization of fission track dating calibration and data reporting. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, **17**, 233-236.
- 池田安隆, 1979, 大分県中部火山域の活断層系. 地理学評論, **52**, 10-29.
- 駒澤正夫・鎌田浩毅, 1985, 豊肥地域の重力基盤構造. 地質調査所報告, 264, 305-333.
- 松本穉夫, 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.
- 森山善蔵・日高 稔, 1981, 別府湾基礎調査(I) - (2)ユニブーム地層探査機による別府湾の海底堆積物の構造. 大分大学教育紀要(自然科学), **5**, 35-53.
- 岡口雅子, 1976, 大分県鶴崎台地の地質の再検討-火砕流堆積物のジルコンによるフィッション・トラック年代-. 第四紀研究, **15**, 97-108.
- Suzuki, M., 1984, Discussion on terminology, anisotropy, and interprocedural cross-checks of fission track ages of zircon. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **90**, 551-563.
- 島崎邦彦・中田 高・千田 昇・宮武 隆・岡村 眞・白神 宏・前杵英明・松木宏彰・辻井 学・清川昌一・平田和彦, 1986, 海底活断層のボーリング調査による地震発生時長期予測の研究-別府湾海底断層を事例として-(予報). 活断層研究, **2**, 83-88.
- 島崎邦彦・中田 高・千田 昇・岡村 眞・谷山 尚・田辺あらし, 1990, 別府湾中央断層(仮称)の地震活動. 地震学会講演予稿集1990(1), 185.
- 首藤次男, 1953, 豊州累層群の地史学的研究(I). 地質学雑誌, **59**, 225-240.
- 竹村恵二・檀原 徹・堀江正治, 1988, 大分層群のフィッション・トラック年代. 日本地質学会第95年学術大会講演要旨, 123.
- 由佐悠紀・竹村恵二・北岡豪一・神山孝吉・堀江正治・

- 中川一郎・小林芳正・久保寺 章・須藤靖明・井川 吉岡敏和, 1992, 大分県, 碩南層群分布南縁部における  
 猛・浅田正陽, 1992, 反射法地震探査と重力測定による  
 別府湾の地下構造. 地震, **45**, 199-212. 横ずれ地質構造. 地質学雑誌, **98**, 53-55.

## (要 旨)

竹村恵二・由佐悠紀・北岡豪一, 1993, 大分平野と別府湾 (深部). 地質学論集, **41**, 35-42. (TAKEMURA, K., YUSA, Y. and KITAOKA, K., 1993, Oita Plain and Beppu Bay : Subsurface structure and geological development around Beppu Bay. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 41, 35-42.)

マルチ・チャンネル地震探査と海底重力調査により, 別府湾の地下構造が明らかにされた. 別府湾横断構造線が主要構造線で, 別府湾を東西の2地域に区分する. 東地域は舟底状基盤構造が特徴的で, 最深部は3,500mに達する. 西地域は主要部分の大きな負の重力異常(-58mgal)を示す地域と北側のリストラック断層群が発達する部分に分けられる. また, 別府湾において現在も活動的な3地域がみられる. リストラック断層が発達する地域, 別府湾横断構造線に沿う地域, 東地域北部の垂直に近い断層が発達する地域である. 別府湾の堆積物の年代は不明であるが, 周辺に分布する新生代層と同じ地層であるとすれば, そのもっとも古いフィッション・トラック年代(約3Ma)から, 堆積速度は1.2mm/年よりも大きいことになる.