

## 重力基盤構造と地震被害の関係 —海外の地震調査（麗江，コジャエリ）の事例—

駒澤 正夫\*・赤松 純平\*\*・西村 敬一\*\*\*・盛川 仁\*\*\*\*・中村 佳重郎\*\*

### Relation between gravity basement and earthquake disaster —As an example of foreign earthquakes (Lijiang and Adapazari)—

Masao Komazawa\*, Junpei Akamatsu\*\*, Keiichi Nishimura\*\*\*,  
Hitoshi Morikawa\*\*\*\* and Kajuro Nakamura\*\*

#### Abstract

The feature of Bouguer anomalies of Lijiang and Adapazari was both characterized by the elongated low anomaly, which corresponds to a big graben structure. The thickness of sedimentary layer of each area was more than 2km and 1km from 3-D gravity analysis, respectively, and the shape of gravity basement was similar to the results of microtremors and seismic-refraction exploration. Comparison of the obtained bedrock structure with the earthquake damage distribution showed that there was a close spatial correlation between the locations of valleys or depressions of the bedrock and those of the heavily damaged zones. Taking this into account, the effect of 3D focusing of seismic waves due to the bedrock topography was examined assuming plane S-waves arriving from the source area of the scenario Nankai earthquake. As a result, it was found that the most damaged zones were distributed near along the valleys where seismic rays focused. This suggests that the effect of bedrock topography on earthquake ground motion should be taken into consideration for seismic hazard assessment.

In conclusion, the basement of low gravity anomaly basin has a feature of structure, which generates so-called basin effect and focusing of seismic energy.

**Keywords:** gravity basement, Lijiang-Jianchuan fault, Adapazari, damage distribution, bedrock structure, degree of focusing or defocusing of seismic rays

#### (要 旨)

重力調査は、重力異常図の作成までの作業が一般的であったが、より発展的な使用方法として重力基盤を算出することで、定量的な構造把握が可能になる。ここでは、地震被害と重力基盤の関係を、中国雲南省で1996年2月3日に起きた麗江（リージャン）地震とトルコで1999年8月17日に起きたKocaeli（コジャエリ）地震を事例として示した。いずれの事例でも重力異常は線状に延びた低重力帯によって特徴づけられ、大きな地溝帯に発達した基盤深度の深い盆地構造を示した。麗江盆地は、堆積層の最大の厚さは2 kmに達すると見積もられた。地震被害の大きかった地域は、低重力帯の西側の縁に存在し、東側に比べ大きな勾配を持っており地震断層（活断層）の可能性がある。地震被害の大きかったアダパザル市街地は、基盤岩が南の山体から逆断層によって1 km以上落ち込む盆地境界の北側に位置することが判った。最後に、重力基盤に対して平面S波入射を想定した地震波エネルギー集中度の計算例を紹介し、重力基盤調査の有効性を示した。

**キーワード：**重力基盤，麗江—剣川断層，アダパザル，地震被害の地域性，基盤構造，地震波エネルギー集中度

\* 応用地質(株)エンジニアリング本部 \*\* 元京都大学防災研究所 \*\*\* 岡山理科大学 \*\*\*\* 東京工業大学

\* OYO Corporation Engineering Headquarters \*\* Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

\*\*\* Okayama University of Science \*\*\*\* Tokyo Institute of Technology

## 1. まえがき

震源からはやや離れているにも拘わらず地震被害が甚大なケースが多く確認されている。原因として基盤構造や周辺の断層構造が関係していることはある程度予想される。基盤構造を簡便に把握する方法として重力調査や脈動観測が有効と考えられる。そこで、中国雲南省で1996年2月3日に起きた麗江（リージャン）地震（M7.0）とトルコで1999年8月17日に起きたKocaeli（コジャエリ：以下カタカナ表記）地震を事例として取り上げ、重力基盤と地震被害の関係について述べる。

麗江地震の際、麗江盆地内の建物の被害分布に顕著な地域性がみられた。地震断層からは数10 kmも離れていることや、過去の地震でも似たような被害分布の地域性が見られたことから基盤構造の影響が震度分布に深く関わるものと推定される。基盤構造や活構造の把握のため、1997～2004年に重力調査のほか脈動観測や地震探査を実施した。コジャエリ地震の際にも、震源から離れていたにもかかわらず Adapazari（アダバザル：以下カタカナ表記）市での甚大な地震被害が生じ、基盤構造との関連を検証するために2000～2001年に重力調査のほか脈動観測を行った。本論では重力調査の解析結果と他の調査結果との比較・検証を行い、地震被害との関連についても考察を加えた。

最後に、以上の調査事例から明らかとなった基盤構造と地震被害の関係について、地震波エネルギー集中度の観点から考察する。

## 2. 重力調査の解析方法

重力調査のデータから地下構造を解析する手法について簡単に説明する。

### 2.1 フィルタリング

フィルタリングは、重力異常から有為な情報を抽出し、定性的な解析・解釈を進めるのに有効な手法である。重力解析で構造抽出に利用されるフィルタリングには、大規模・深部構造に対応する長波長成分を抽出するローパス・フィルタ（或いは、ハイカット・フィルタ）、微細・浅部構造に対応する短波長成分を抽出するハイパス・フィルタ（或いは、ローカット・フィルタ）がある。また、注目する特定の規模・深度の構造に対応した波長成分を抽出するバンドパスフィルタがある。

ここでは、フーリエ級数法を用いて、コンボリューション積分（積和）のウェイトを簡単に求める方法を示す。重力値（ $g$ ）にインパルス関数（デルタ関数）をウェイト関数  $w(x, y, z)$  としてコンボリューション積分（積和）を行うと、

$$g(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x - \xi, y - \eta, z) w(\xi, \eta, z) d\xi d\eta \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi, \eta, z) w(x - \xi, y - \eta, z) d\xi d\eta \quad (1)$$

$$w(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(imx + iny) - \sqrt{m^2 + n^2} z) dmdn \\ (i: \text{虚数単位}) \quad (2)$$

となる。ここで、接続フィルタ、微分及び積分フィルタを施す場合、ウェイト  $w(x, y, z)$  に所定の操作を施して、ウェイトを計算すれば良い。更に、コンボリューション積分をすれば、上方接続、2つの上方接続の差を用いたバンドパスフィルタ、鉛直微分、水平微分などのフィルタ図が得られることになる。例えば、2つの上方接続フィルタ（ $z=H_1 < H_2$ ）を組み合わせたバンドパスフィルタのウェイトを実数表現にすると、

$$w(x, y, 0) = \int_0^1 \int_0^1 \{ \exp(-\sqrt{m^2 + n^2} H_1) \\ - \exp(-\sqrt{m^2 + n^2} H_2) \} \cos mx \cos ny dmdn \quad (3)$$

となる。

フィルタ操作が最も一般的に使用されるのは、断層等の構造境界の抽出である（図-1）。

### 2.2 定量解析

地下構造を求める定量解析には、密度差のある境界面の起伏の平均的な平面を想定し、平均面より上方にある分の正の過大質量と平均面より下方にある負の過小質量を平均面にあるかのような仮定の基に、重力異常から構造を求める直接法（一種の下方接続フィルタ

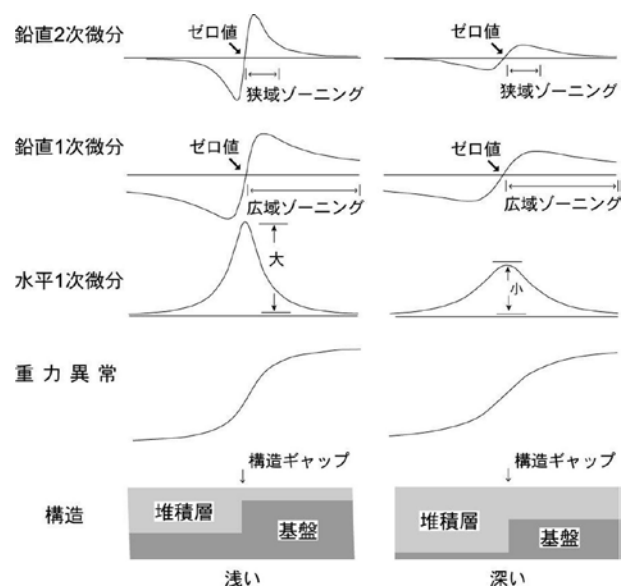


図-1 落差が同じで深さが違う単純な構造の場合の重力異常へのフィルタ適用例（駒澤（1998）<sup>1)</sup>に加筆修正）

Fig. 1 Filtered gravity profiles generated from the same gap structure with different depths.

操作)と、地下構造のモデルから重力異常を計算し、観測重力値にマッチングさせる間接法(フォワード法)がある。フォワード法には、モデル構造を計算するのに便利なタルワニの方法(Talwani et al., 1959)<sup>2)</sup>や、自動解析として反復修正法がある。

解析上の注意事項としては以下のものがあげられる。

(1) 求めようとする構造以外に起因する重力異常の除去(トレンドの除去)が必要である。実際の処理としては、周波数解析による低周波成分や重力異常を一次式にフィッティングさせた傾向面を除去することによる。場合によっては、地震探査などの深部構造データをモデル化した重力を計算して除去する。上方接続フィルタを利用するのも物理的な意味がはっきりしているので良く利用される。

(2) 密度差の設定が最も重要で、解析結果に直接影響するので、ボーリングや岩石試料による密度測定等から現実に近い値を設定する。さもなければ、多数のモデル計算をして現実に近いものを選定する。

(3) ブーゲー異常値は、地表面での値であることを認識してモデルを設定し、重力値は地表面での値を計算する。海水準での値であると間違った認識のままだと、標高が高いところで基盤が露出しているようなケースでは解析自体が不可能になる。

### 2.2.1 2次元モデル解析

地下構造が2次元で近似できる場合に適用できるが、構造に多少3次元性があっても重力異常は直下の影響を最も強く受けるので、使い方さえ間違えなければ2次元解析の近似解も有効である場合が多い。2次元解析は、3次元解析に比べ1回当たりの解析時間が圧倒的に短くて済むので、パラメータの設定を変えて何回でも試行錯誤的処理ができる。また、複雑な多層モデル計算も簡単にできるだけでなく、構造が断面で与えられるというのも構造を直感的に理解し易くする。

均質2層構造が最も単純で基本的なもので、複雑な構造に対しても基本的なアプローチは変わらない。

観測値  $g^{res}$  (トレンドを除去したもの) と反復修正法による第  $n$  回目のモデル構造の深度  $D^{(n)}$  による計算値  $\Delta g^{(n)}$  との差を  $2\pi G\rho$  で割ったものが構造の修正分になるので、第  $n$  回目のモデル構造の深度  $D^{(n+1)}$  は、

$$D^{(n+1)} = D^{(n)} + \lambda \cdot (\Delta g^{(n)} - g^{res}) / 2\pi G\rho \quad (4)$$

になる。なお、 $G$  は万有引力定数である。重力値を計算する計算式については、構造が計算点より上方にくる場合も想定した適切なものが必要である。ただし、式(4)では  $\rho$  は表層と基盤層の密度差で正とした。 $\lambda$  は修正量を調整するパラメータで通常は  $\lambda = 0.5 \sim 1$  程度を設定して無意味な振動を伴う急峻な構造をつくらないようにして緩やかに収束させてやるのが解析上

のコツである。

### 2.2.2 3次元モデル解析

地下構造が2次元で近似できないと想定される場合や、広範囲の3次元構造を直接求める場合には3次元モデル解析を行う。方法としては、地下構造モデルを鉛直角柱がメッシュ状に並んだ集合体とする場合が多い。また、重力は距離に対してさほど減衰しないため、想定する構造モデルを外挿などして計算範囲を広くとって計算結果にバイアスが生じないように配慮する必要がある。モデルに対する計算値が観測値に収束するようにモデルを修正させれば3次元の自動解析も可能である((4)式を3次元に適用)。観測面が平面上であれば、フーリエ級数(積分)を用いた解析法が、圧密なども考慮できるので実際の構造に近い解析ができる。この方法についてKomazawa(1995)<sup>3)</sup>を例示する。軸の正を下方に取り、密度分布が3次的に  $\rho(x, y, z)$  で与えられるとき、重力異常  $\Delta g(x, y, z)$  の一般式は、

$$\Delta g(x, y, z) = \frac{G}{2\pi} \iint d\mu dv \iint d\xi d\eta \int_{\xi, \eta, \zeta}^{\infty} \rho(\xi, \eta, \zeta) \times \exp[iu(x-\xi) + iv(y-\eta) + \omega(z-\zeta)] d\zeta \quad (5)$$

(ただし、 $\omega = \sqrt{u^2 + v^2}$ )

となる。なお、 $\Delta g(x, y, z)$  は計算重力値、 $G$  は万有引力定数である。

## 3. 重力と地震の併合調査の事例

### 3.1 中国雲南省麗江地震

中国雲南省で1996年2月3日に発生した地震(麗江(リージャン)地震)(M7.0)の地震被害には基盤構造が関連していることを検証するために、重力調査(駒澤ほか, 2000)<sup>4)</sup>を行った。その概要を示し考察を加える。

#### 3.1.1 重力調査とブーゲー異常の概要

1998年8月と1999年8月に実施した重力調査の測定点の総数は390点に達したが、調査エリアは麗江盆地内に限られている(駒澤ほか, 2000)<sup>4)</sup>。1998年には、盆地の中部-南部の130点で測定し、そのうち70点については、同時期に実施した屈折法地震探査の測線上に配置した。1999年には、盆地北部、麗江-劍川(ジャンチン)断層及び盆地北西部の玉龍雪山(ユーロンシュエサン; 標高5,595m)中腹など盆地外縁部の山地で測定を行った。測点数は約260点とした。2002年~2004年の3ヵ年には西部の拉市(ラシ)盆地や南部の鶴慶(ホーチン)盆地に範囲を広げて重力調査を行った。後半の3ヵ年での測定点数は、560点に達した。2002年~2004年の調査全般をとおして使用した重力計(4台)はドリフトが0.1mGal/日を越

すことは殆どなく、きわめて安定していた。また、2000 mGal 近い重力差の日本との接続では簡便なキャリブレーションを行い、複数の重力計で重力差が生じないように考慮した。なお、重力調査の測定点は5カ年にわたって総計950点となった。

データ処理は以下のとおりである。地形補正に用いた地形データは、以下の2段階の方法で作成した。ひとつは、測点の近く（半径4kmまで）を補正するためのもので高精度でメッシュ間隔の小さいものが必要

で、NASA (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>)<sup>5)</sup> の作成による公開データ SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) の3"×3"メッシュ(約90m×90m)を今回は利用し、重力測定点の標高データも加えて、メッシュデータを再構築した。計算法は、メッシュ点の近傍領域に重み付きの二次曲面フィッティングによった。計算過程で、SRTM-DEM (digital elevation model の略) がディファレンシャルGPS測量による標高値とも高精度で整合することを確認できた。作成

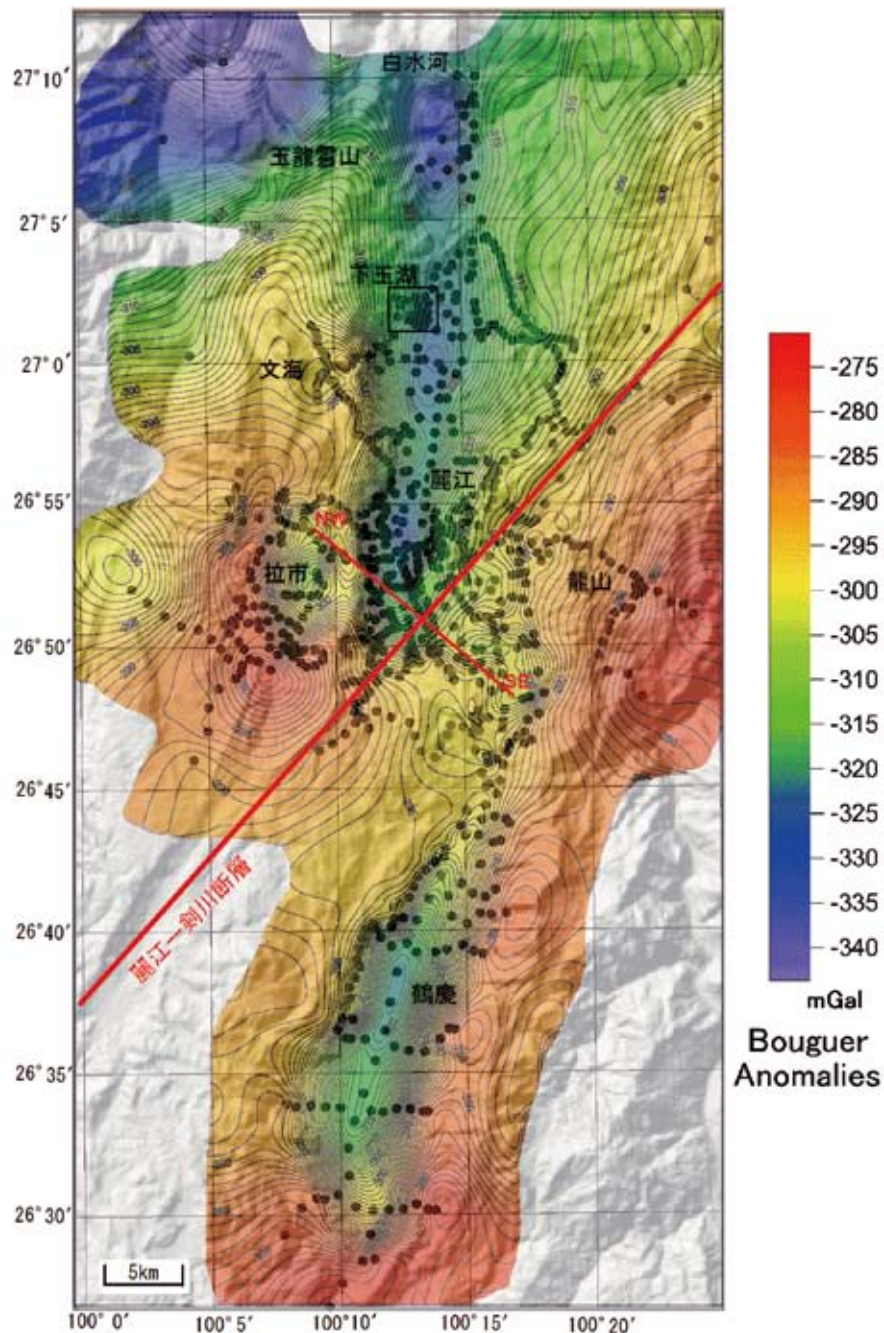


図-2 麗江盆地と鶴慶盆地周辺域の重力異常（ブーゲー異常）。仮定密度は、 $267 \text{ g/cm}^3$ 。コンター間隔は1 mGal（ミリガル）。レリーフは地形で、SRTMによる90 mメッシュの地形データより作成。下玉湖の四角の領域は、図-3、4の精査域。NW-SEは、屈折法地震探査測線。

Fig. 2 Gravity anomalies of Lijiang basin and Hoching basin (Bouguer anomalies). Assumed density is  $267 \text{ g/cm}^3$ . Shaded map is topography made with SRTM 90 m DEM. Area of the rectangle mark is the detailed survey area and a drawing area of Figures 3 and 4. NW-SE denotes refraction seismic line.



したDEMのメッシュ間隔は100mとした。もうひとつは、測点から離れた(半径4~60kmの領域)部分の地形による影響を補正するもので、精度やメッシュ間隔の条件は測点の近くに比べ厳しくない。ここでは、やはり公開メッシュデータであるSRTMの30"×30"のメッシュデータを用いた。メッシュ間隔は約900m×900mで、座標系もWGS84(現在、一般的に使用されている世界測地系で、国土地理院の地形図も2000年から採用されている)のためデータはそのまま利用した。精度についても1kmメッシュとしての精度は充分もっていることも確認した。地形補正は、実際の地形を仮想扇形プリズムの集合体に近似して60kmまで行い、地球の曲率による地形の沈み込みの効果も考慮してある(駒澤, 1988)<sup>6)</sup>。重力値は国際重力基準網(IGSN71)に接続し、正規重力値は測地基準系1980(GRS80)による1980年式で計算した。なお、SRTMが利用できるようになったことで、重力調査において必須であった地形補正が、全世界の陸域において容易に実施できるようになった。

調査域は盆地堆積物が厚く堆積している地域なので、一般的に表層密度は低いと考えられる。しかし、玉龍雪山の麓にあたる盆地北部では氷河堆積物の分布が見られることや、測点標高も高いことから表層密度が大きくなっていると考えられる。また、盆地外縁部の山間部・丘陵域についても、盆地に比べて表層密度が大きいと考えられる。このような地域ではブーゲー異常の仮定密度として堆積層の密度を採用すると、地形との相関が表れてしまうので、表層の効果を除去できず基盤構造を反映した重力異常が得られなくなる。このように、各種の地質ブロックが混在しているときはブーゲー補正と地形補正に用いる密度を決めるのは難しいが、地形の起伏が最も大きい地質ブロックの密

度を仮定すると起伏の影響が全体的に除去され解析が容易になるので、ここでは盆地外縁部の山間部・丘陵域の密度によるブーゲー異常を用いた。山間部・丘陵域の密度推定には「上方接続残差比較法(CVUR法)」(Komazawa, 1995)<sup>3)</sup>を用いた。地形の起伏が大きく測点数が多く精度が高いと考えられる麗江市街東方の丘陵地については、密度が2.68g/cm<sup>3</sup>のとき分散量が最少になり、それが最適な密度と考えられる。更に、解析点を移動させて面的な表層密度を求めたところ、盆地外縁部の基盤を形成する山岳部や丘陵域(麗江市街東方の丘陵地を含む)の密度は2.6~2.7g/cm<sup>3</sup>程度という結果になった。それらの地域の地質は、主として石灰岩と玄武岩から構成されており、密度としては妥当な値と考えられる。基盤が露出している地域のブーゲー異常として一般的に使われており、表層密度解析の結果にもほぼ一致するため、ここでは仮定密度2.67g/cm<sup>3</sup>のブーゲー異常を図-2に示す。コンター間隔は1mGalで、5mGal毎に太線で描かれている。

重力異常は、先ず麗江盆地と鶴慶盆地の形(図-2の背景になっている地形を参照)に対応するように南北に延びる低重力異常帯によって特徴づけられる。麗江盆地のブーゲー異常値は麗江地震台西方の盆地中央部で最も低くなっている。その東と西でコンターが密になり、両側の山地に向かって重力異常値は急増する。盆地の北部、北緯27°付近にも低重力異常域が存在する。さらに、盆地北縁の分水嶺を越えた北側の白水河流域にも低重力異常域があるが、測点分布が限られている地域なのでその規模や形状の詳細は明らかでない。一方、盆地中央部から南へ向かって重力値は漸次増大している。盆地南部を北東-南西方向に横切る麗江-劍川断層には大きい重力勾配は見られないが、

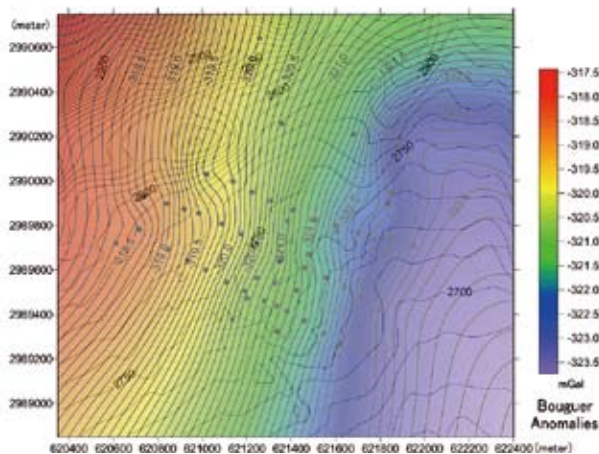


図-3 下玉湖断層域の重力異常(ブーゲー異常)。仮定密度は2.67g/cm<sup>3</sup>。コンター間隔は0.1mGal(ミリガル)。座標値はUTMのメートル。

Fig. 3 Gravity anomalies around Xiayulong fault (Bouguer anomalies). Assumed density is 2.67 g/cm<sup>3</sup>. Contour interval is 0.1 mGal. Coordinates are in meter of UTM.

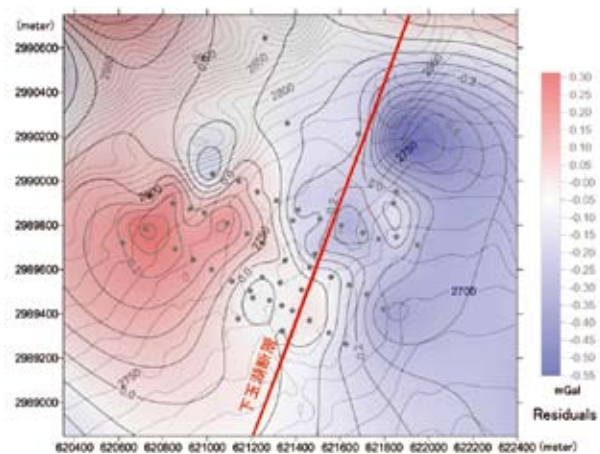


図-4 下玉湖断層域の残差重力。仮定密度2.67g/cm<sup>3</sup>のブーゲー異常より算出。コンター間隔は0.05mGal(ミリガル)。座標値はUTMのメートル。

Fig. 4 Gravimetric residuals around Xiayulong fault. Assumed density is 2.67 g/cm<sup>3</sup>. Contour interval is 0.05 mGal. Coordinates are in meter of UTM.

盆地南東部の支盆地にも相対的に低重力異常の領域が見いだされたことが注目される。それは、盆地形成の後に左横ずれの造構運動があったことを示している。鶴慶盆地のブーゲー異常は、盆地の縁に基盤落差があり盆地中央で基盤が深くなるような比較的単純な構造を示している。

麗江盆地の麗江—剣川断層の南東側にある支盆地と鶴慶盆地のいちばん北側には、直径数 km の低重力異常が南北に並んでいるが、重力的には明瞭な不連続性は見出されていない。

雪山断層系の断層のひとつとして下玉湖断層が地質的に推定された下玉湖周辺で、測点間隔を 100 m 程度とした精密重力調査を行った。その結果を図-3 に示

す。図-3 を見ると、北西から南東に向かって重力異常が単調に減少していくのが判る。これは、広域地質構造や深部構造に対応した長波長成分を表しているものである。その広域傾向面を 125 m の上方接続（式(3)で  $H_1=0$ ,  $H_2=125$  としたもので、上空 125 m で観測される重力異常）とし、それを重力異常から差し引いた残差重力図を図-4 に示す。図-4 は、深度が数 100 m より浅い密度構造を反映するもので、必ずしも断層に対応するリニエーションが明瞭ではないが、東落ちの基盤構造を示唆している。詳細にみると、下玉湖断層に沿った南側で地形の張り出しと対応するように高密度域（高重力域）の張り出しが存在するのに対し、その北側では山側（西側）に 200 m ほど後退して

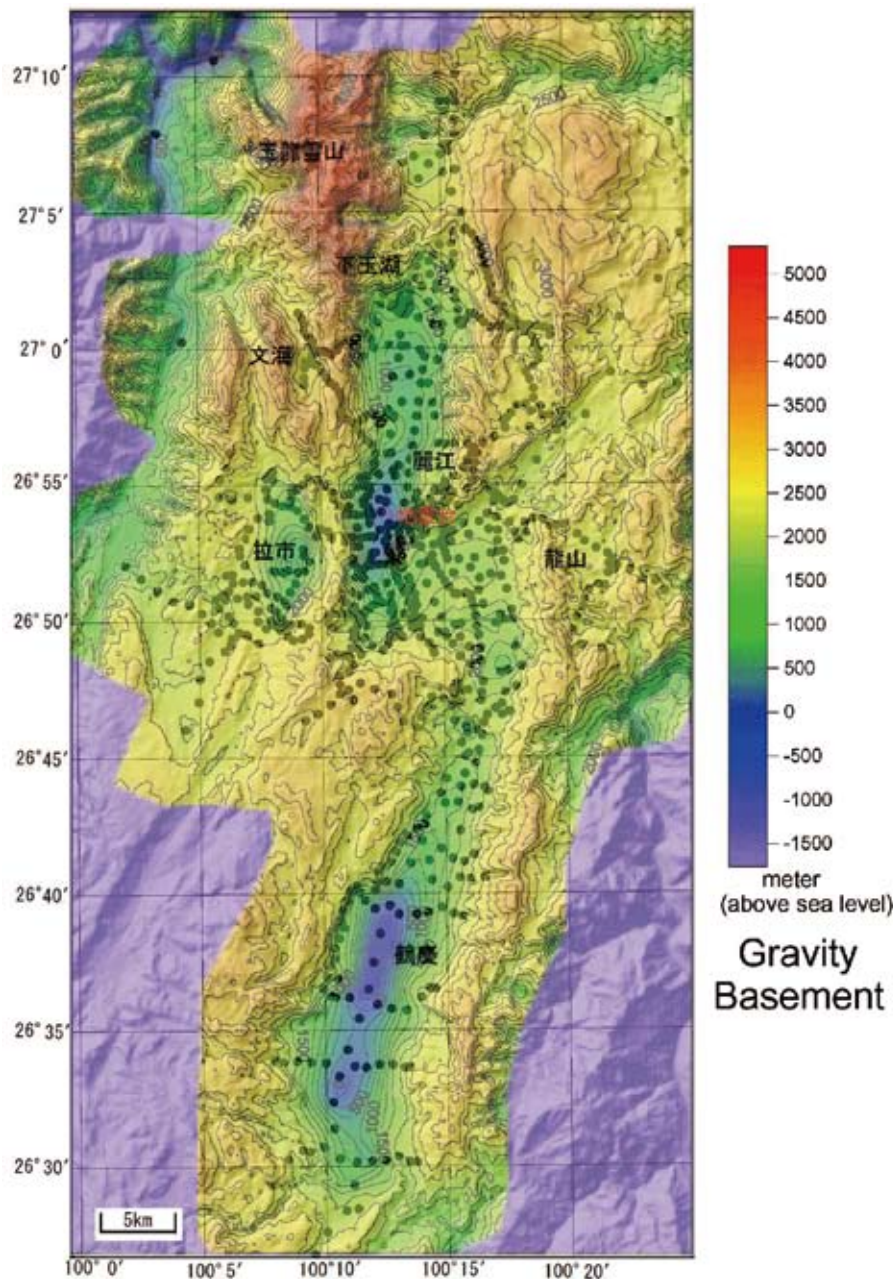


図-5 麗江盆地と鶴慶盆地周辺域の重力基盤図（標高表示）。密度差は  $0.5 \text{ g/cm}^3$ 。コンター間隔は 250 m。

Fig. 5 Gravity basement of Lijiang basin and Hoching basin (above sea level). Density contrast is  $0.5 \text{ g/cm}^3$ . Contour interval is 250 m.



おり地形的にも谷になっているのが判る。つまり、この周辺の地形の起伏は単なる侵食によるものではなく、地形が基盤構造に対応していることを示している。

### 3.1.2 重力基盤の算出

重力異常から盆地の基盤構造を推定するために2.2.2に示した重力の3次元解析を行った。方法は、基盤構造を格子状に配置した多数の角柱でモデル化し、その重力効果を反復修正法によって観測値にマッチングさせる自動解析である(2.2.2参照)。基盤と表層(堆積層)の密度を仮定せねばならないが、いまのところ広域的な密度差が設定できる岩石サンプルなど具体的な情報がないので、基盤の密度としては丘陵部の表層密度解析の平均値に近い $2.67\text{ g/cm}^3$ を仮定した。堆積層の密度については一般的に堆積層の密度として使われる $2.0\text{ g/cm}^3$ は表層部のもので、深度が増すと圧密のため密度の増加が考えられる。本解析では基盤と堆積層の密度差が $0.5\text{ g/cm}^3$ になるように堆積層の平均的な密度として $2.17\text{ g/cm}^3$ を仮定した。また、観測データとして仮定密度 $2.67\text{ g/cm}^3$ のブーゲー異常を用いた。この密度値のブーゲー異常を用いるメリットは、既に表層の地形効果が地形補正によって除去されているため浅い基盤の起伏が引き起こす短波長の重力効果の扱いが容易になることである。重力基盤の解析深度に比べ深い密度構造による広域傾向面(重力異常の長波長成分)は5 kmの上方接続フィルタで除去した。

解析結果の重力基盤を標高のコンター図で図-5に、基盤深度(堆積層の厚さ)のコンター図で図-6に示す。また、鳥瞰図の形で図-7に示す。なお、図-5と図-6のコンター間隔は250 mである。麗江盆地中央を南北に伸びる深い谷状構造が顕著で、下玉湖以南では深度は1 kmより深くなっている。最深部は、麗江地震台西方1.5 km付近で基盤は海拔以下になって深度は2,400 mに達している。その南方3.5 km付近にも局所的な窪みが見られ深度は2,200 m程度である。この谷状構造の両側では基盤が急勾配で浅くなっている。特に、西側では山体を含めた落差は大きな勾配と言える(特に、鳥瞰図では直感的に判る)。東側については、麗江地震台周辺で大きな勾配になっているが、それより北側については西側に比べ勾配は緩やかに見える。麗江-劍川断層より南東側では最深部が東側に10 kmほどオフセットを生じており、深度も数100 m程度と浅く、明らかに構造が異なっている。この麗江-劍川断層の南東側の落ち込み域はそのまま南に伸びて基盤が深い鶴慶盆地にスムーズにつながっている。鶴慶盆地の重力基盤の形状も測点が少ないながらもいくつかの南北に伸びた陥没構造が連なっているように見える。最深部は、2,500 mに達し海拔下に基盤面があることを示している。両盆地の基盤の形状や深度は極めて似ていることも明瞭になった。

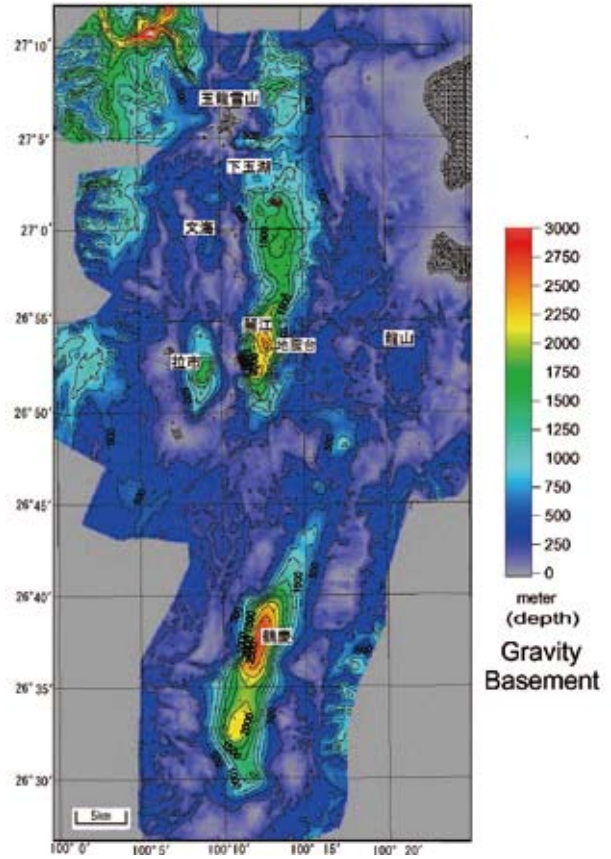


図-6 麗江盆地と鶴慶盆地周辺域の重力基盤図(深度表示)。密度差は $0.5\text{ g/cm}^3$ 。コンター間隔は250 m。

Fig 6 Gravity basement of Lijiang basin and Hocking basin (depth). Density contrast is  $0.5\text{ g/cm}^3$ . Contour interval is 250 m.

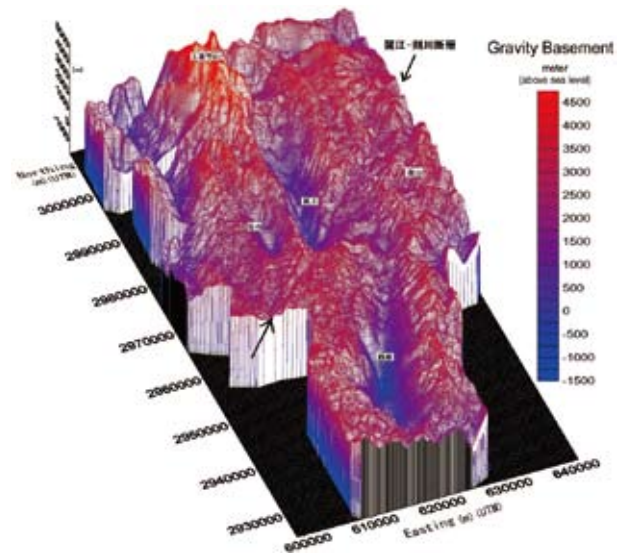


図-7 麗江盆地と鶴慶盆地周辺域の重力基盤図(鳥瞰図表示)。座標値はUTMのメートル。

Fig 7 Gravity basement of Lijiang basin and Hocking basin (bird's eye view). Coordinates are in meter of UTM.

麗江盆地の南西部を横切る測線(図-2)では、1998年に屈折法地震探査(西村ほか、1999)<sup>7)</sup>が実施されており、この測線に沿って2次元の重力自動解析を行った。その結果を図-8に示す。速度構造(図-9)の上図は、4.1 km/sでリデュースした走時パターンで、西側が急勾配の特徴は重力解析と整合する。一方、下図の速度構造は、堆積層の最深部が1 km弱で、重力解析で得られた結果の約半分となっている。なお、密度モデルの密度差は0.5 g/cm<sup>3</sup>と重力基盤の3次元解析と同じに設定した。また、解析測線の表層が堆積層であることを考慮して堆積層と基盤の密度は2.0 g/cm<sup>3</sup>と2.5 g/cm<sup>3</sup>と3次元解析に比べやや小さく設定したが、解析した深度に大きな差は生じない。堆積層の速度と密度について、各々より低く仮定すれば両者の解析深度も近いものになるが、P波速度をこれ以上低くするには限界があると考えられる。したがって、堆積層の密度をかなり小さくしてやるのが現実的と考えられる。但し、いずれの仮定でも基盤の落ち込みの勾配は西側で極めて大きいとの結果を得た。

### 3.1.3 重力基盤と地震被害の考察

麗江盆地の重力基盤の形状と脈動H/Vスペクトル比のピーク周期の分布(赤松ほか、1998)<sup>8)</sup>は興味深い。なお、H/Vスペクトル比は、軟弱な地盤では水平動が上下動に較べて大きく、堅固な地盤では水平動と上下動が同程度の振幅で波形特性も類似する性質を利用するものである。赤松ほか(1998)<sup>8)</sup>の結果では、ピーク周期が、北側の凹地中央部では0.9秒であるのに対し、南側の凹地中央部では4.5秒であり、その違いは重力異常の差から想定される基盤岩深度の違いに比べて極めて大きい。北側の凹地に対応する盆地北部の表層地質は、玉龍雪山からの礫(主として玄武岩質)の多い更新世の氷河堆積物であるが、南側の凹地に対応する盆地の中～南部及び南東の支盆地では完新世の湖沼堆積物に覆われている(Kusuda & Nakamura, 1997)<sup>9)</sup>。このような表層地質の違い、すなわち堆積層の速度の違いがH/Vピーク周期の違いに反映したものと推測される。南北に伸びた低重力異常域は東側よりも西側で大きな勾配をもっている。地形的にも線状構造が見られ、重力勾配の大きいところは盆地の内側にあたっている。地震探査の結果でも盆地西縁での基盤の落ち込みが観測されている(西村ほか、1999)<sup>7)</sup>ので、盆地境界の構造を反映したものであると思われる。次に、麗江―劍川断層に関しては、盆地内だけではなく盆地東部の山地部においても基盤の落差を示す重力勾配は顕著でなく、むしろ左横ずれを示唆するコンターの屈曲が見られる。麗江―劍川断層は、地質学的には左横ずれの卓越する活動的な断層帯である(国家地震局地質研究所・雲南省地震局、1990)<sup>10)</sup>。図-10に示した地質図からは、もともと地溝帯として南北に並んでいた麗江盆地と鶴慶盆地が、断層帯の活動により麗江盆地南部でオフセットされたように見え

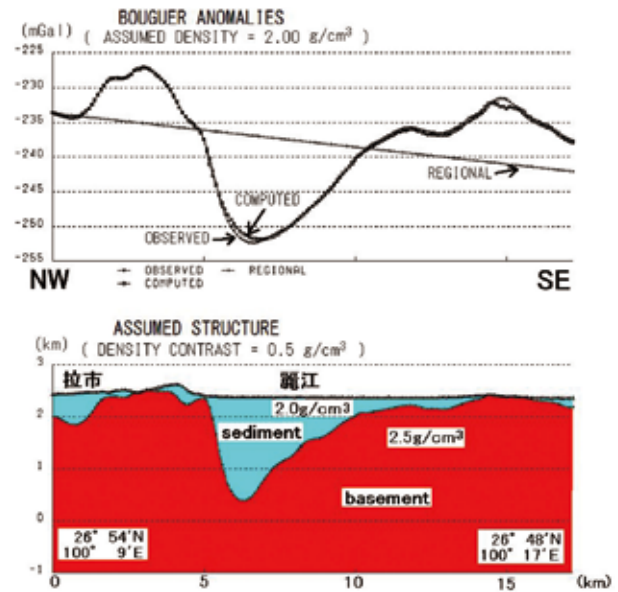


図-8 麗江盆地南部の2次元重力解析

Fig. 8 2D gravity analysis of south area of Lijiang basin.

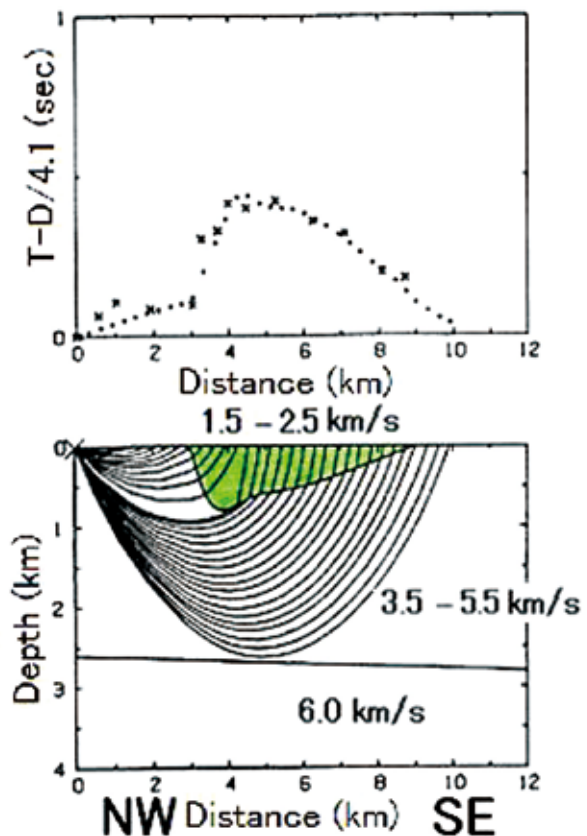
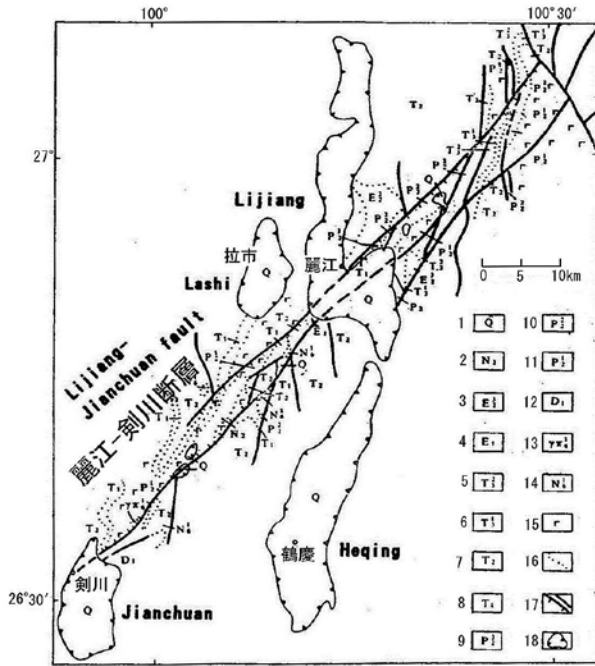


図-9 麗江盆地南部の屈折法地震探査(西村ほか、1999)<sup>7)</sup>

Fig. 9 Refraction seismic survey of southern area of Lijiang basin.





1: 第四系 2: 新第三系 3, 4: 古第三系 5~8: 三疊紀 9~11: 二疊紀 12: デボン紀  
13, 14: ヒマラヤ造山期深成岩 15: 玄武岩 16: 地層境界 17: 断層 18: 第四系盆地

図-10 麗江—劍川断層周辺域の地質構造図<sup>10)</sup>

Fig. 10 Geological setting around Lijiang-Jianchuan fault<sup>10)</sup>.

る。このような推測は、重力異常のコンターの屈曲をも説明するが、雲南地域の構造発達史から確認する必要がある。

最後に、基盤構造と盆地内の地震被害集中との関連を検討する。図-11は主として建物被害から求められた震度分布である(Jiang, 1997)<sup>11)</sup>。特徴として、①盆地西麓縁に沿って南北に伸びる帯状の地域、②麗江—劍川断層付近、の2つの地域で震度が大きい。前者は、1995年兵庫県南部地震による神戸・阪神地域の場合と同様、盆地西縁の断層に関係する基盤の急激な落ち込みに関与したものと考えられる。一方、後者については、当初大阪府下の上町断層沿いに見られた被害集中と類似の現象(基盤の起伏の急変部による地震波のフォーカシング; Nakagawa et al., 1998)<sup>12)</sup>も想定されたが、上記の重力異常分布や重力基盤にはそれを支持する特徴は見られない。従って、別の要因、例えば断層に付随する弱線(帯)による地震動の増幅、あるいは、小ブロックの基盤岩のランダムに独立した異常震動(小玉, 1996)<sup>13)</sup>などが関係したのではないかと推測される。

### 3.2 トルコ・Kocaeli (コジャエリ) 地震

トルコで1999年8月17日に起きたKocaeli(コジャエリ:以下カタカナ表示)地震では震源から離れていたにもかかわらずAdapazari(アダパザル:以下カタカナ表記)市で甚大な地震被害が生じた。そこで地震被害と基盤構造が関連していることを検証するた

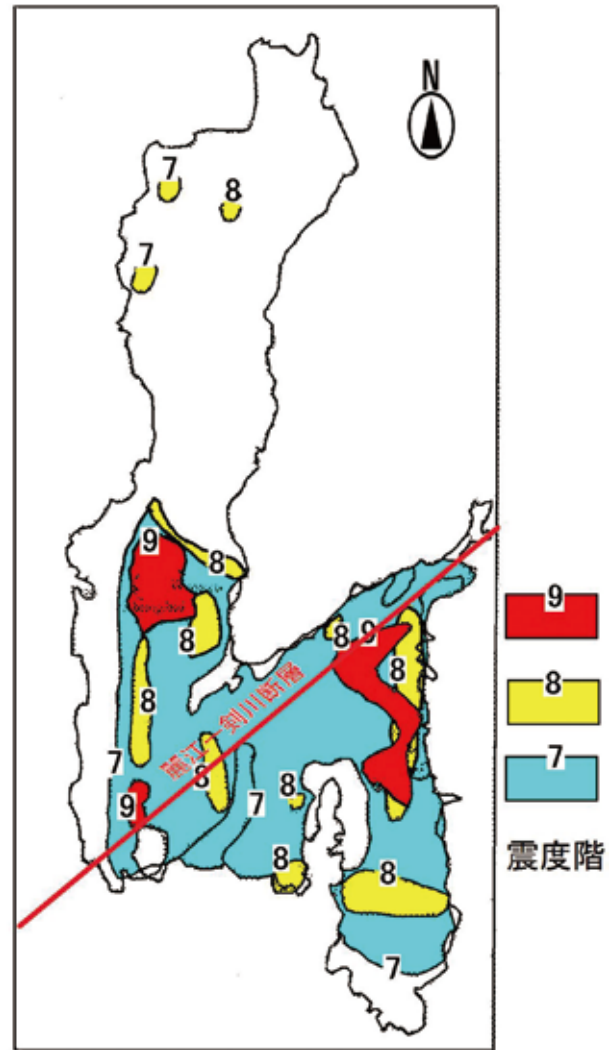


図-11 1996年麗江地震による盆地内の震度分布図(Jiang, 1997)<sup>11)</sup>。震度階は雲南省地震局による。

Fig. 11 Distribution of intensity (MM) in the Lijiang basin for the 1996 Lijiang Earthquake (Jiang, 1997)<sup>11)</sup>.

めに重力調査(Komazawa et al., 2002)<sup>14)</sup>を行った。

#### 3.2.1 重力調査とブーゲー異常の概要

震源からは離れているにも拘わらずアダパザル市街の地震被害は甚大(USGS, 1999)<sup>15)</sup>で、基盤構造や周辺の断層構造が関係しているものと思われたが、有効な資料は存在しなかった。そのため、2000年8月にアダパザル盆地で重力調査と長周期微動(脈動)観測を行い、地殻構造、活構造を求めるとともに、それらと地震被害との関係を把握することとした。重力調査に使用した重力計は、シントレックスCG-3M(S/N:258)とLaCoste G型(S/N:304)で、測定点の総数は440である。重力値は日本の重力点から接続し、IGSN71に準拠させた。データ処理は、3.1.2に示した方法によって実施した。調査域は盆地堆積物が厚く堆積している地域で、表層密度は低いと考えられる。しかし、盆地の北の丘陵部にはデボン紀やシルル紀の

古生代の基盤が露出しており表層密度も高いことが予想される。また、盆地周辺の山岳部では基盤の分布が見られることや、測定標高も大きくなり表層密度が大きくなっていると考えられるので地形補正とブーゲー補正の密度を平均的な  $2.3 \text{ g/cm}^3$  に設定した。図-12 にアダパザル盆地のブーゲー異常図を示す。主な特徴を以下に示す。(1) Sakarya (サカリヤ) 大学のある山体とアダパザル方向への平地(地形は、図-16 参照)との間の重力急変帯があり、これと西から東に破壊が進んだコジャエリ地震の震源断層を考え併せるとアダパザル方面へフォーカシングが予想される位置にある。(2) サカリヤ大学のある山体は高重力異常を示すが、その高重力異常は地形的に平坦になる東方にまで伸びており基盤の平野部への張り出しが予想される。(3) 盆地南東部の山体と Akyazi (アキヤズ) 方面の平地との間に重力急変帯があり、アキヤズを含む平地には、北東方向の長軸をもつ非常に深い凹地が見いだされた。アキヤズ周辺はアダパザルに次いで地震の被害が大きく、地盤の脆弱性が重力異常にも現れている。(4) 盆地北部を東西方向に横切る重力急変帯が見いだされた。しかし、これには対応する地形的特徴は見られず、純粋に地下構造を反映したものである。この急変帯の解釈としては、北側にあるデボン紀の高密度地層(基盤)と南側のより新しい低密度地層(基盤)の地質境界か、基盤の非常に急峻なギャップ

(南落ち)のいずれかを反映する可能性が考えられるが、脈動観測データも併せて後述する。

### 3.2.2 重力基盤の算出

重力異常を説明する基盤構造を表層と基盤の密度差を  $0.5 \text{ g/cm}^3$  に仮定した均質2層構造として計算した。結果をコンター図にしたものを図-13に、鳥瞰図にしたものを図-14に示す。アダパザル周辺の基盤の落差を判りやすく示すためにSSW-NNE測線(図-12)について2次元解析を実施した結果を図-15に示す(図-14は左側が北になっているので注意)。アダパザルの直下は、水平距離2kmに対して1.5kmもの落差がある急勾配を示していることが判る。

重力調査と併行して長周期微動(脈動)観測によるH/Vスペクトル解析を40点程行ったので、重力基盤との整合性を述べておく。長周期ピーク周期  $T_p$ (図-16)は、全体的に南へ向かって大きくなり、盆地南縁部においても大きい値を示している。盆地南東部で最大値を示し、重力基盤が深いことと調和的である。盆地北部の北緯  $40^\circ 48'$  付近を境に  $T_p$  は南北で大きく異なっている。これは、盆地北部を東西方向に横切る重力の急変帯に対応しており、このことから、重力の急変は基盤の岩質の違いによる密度差というよりは、基盤の深度の違いを表していると考えられる。アダパザル市街地の  $T_p$  は比較的大きく( $\sim 3$ 秒)、盆地基盤

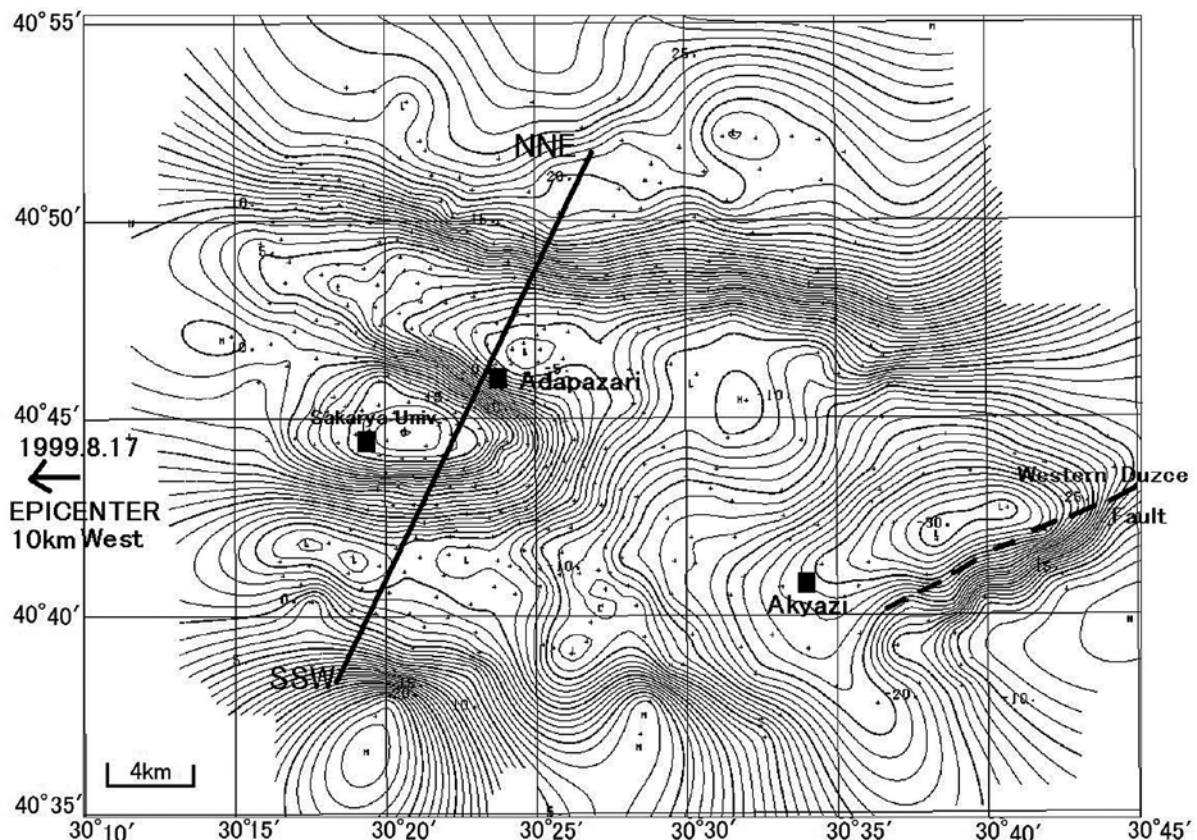


図-12 トルコ・アダパザル盆地のブーゲー異常図。コンター間隔は1 mgal。仮定密度は  $2.3 \text{ g/cm}^3$ 。

Fig. 12 Bouguer Anomalies of Adapazari Basin. Contour interval : 1 mgal. Assumed Density :  $2.3 \text{ g/cm}^3$ .



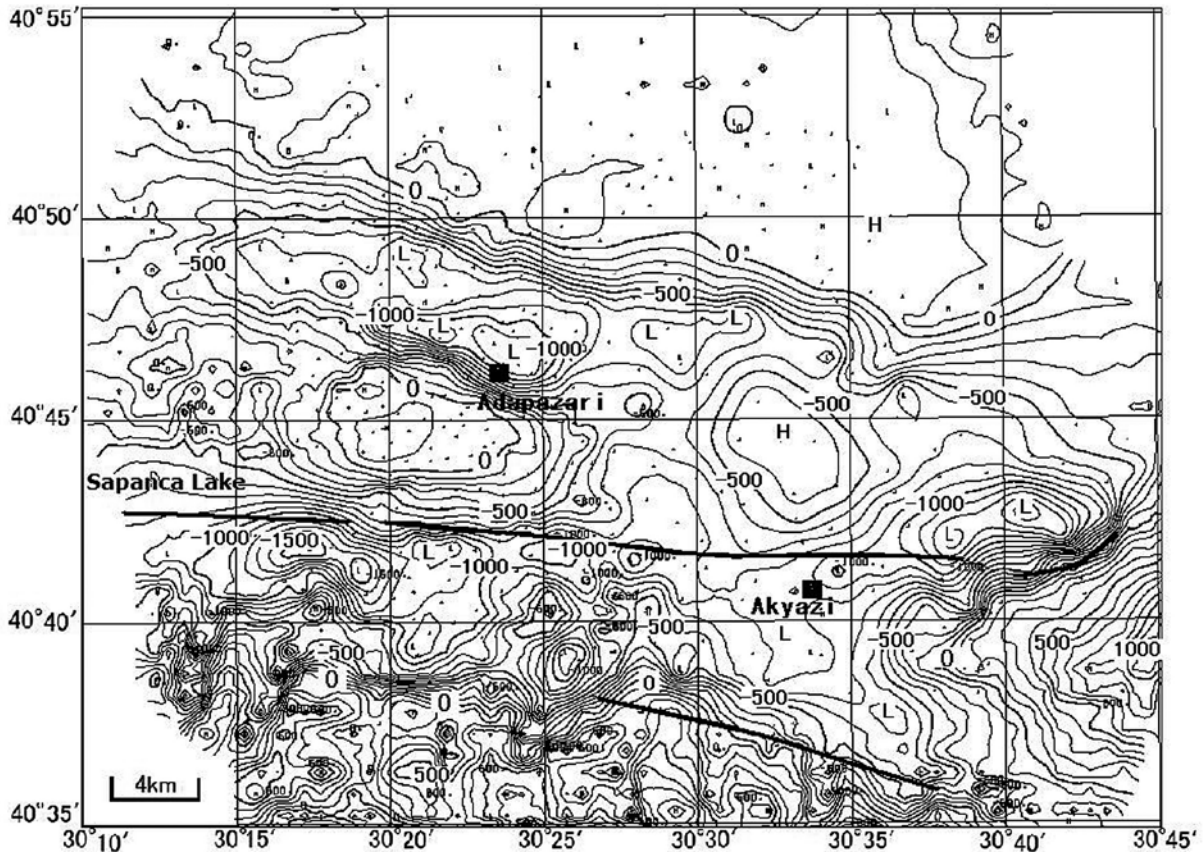


図-13 トルコ・アダバザル盆地の重力基盤. コンター間隔は100 m. 密度差は0.5 g/cm<sup>3</sup>.

Fig. 13 Gravity basement of Adapazari Basin. Contour interval : 100 m. Density contrast : 0.5 g/cm<sup>3</sup>.

が深いことを示している。更に、盆地東部の北緯40°47′、東経30°38′付近から南西方向に半島状に突き出ている地形の延長に小さいTpが分布しているが、これは、重力基盤の隆起と極めて対応が良い。このように結果的に、相対的にはTpの分布は重力基盤構造と極めて調和的である。

### 3.2.3 重力基盤と地震被害の考察

重力基盤の概略として盆地の基盤が2～3の凹地から形成されている。具体的に述べると、(1) アダバザル付近で基盤深度が1,000～1,200 mで幅約4 kmの東西に伸びた舟状凹地になっており、最も地震被害が大きかったところである、(2) Sapanca (サパンジャ) 湖から南の山地の縁を深度1,000～1,500 mで東に伸び、一旦、800 m程度まで浅くなるが、アキヤズ付近で再び深くなり1,500 mに達する東北東に長い凹地があり、やはり、地震の被害が大きかったところである。(3) アダバザル東方15 km、アキヤズ北方8 kmには、直径5 km程度の深さ400 mより浅い平坦な隆起域が見いだされている。ここは、地震被害は少なかったようである。

アダバザル市街地は、基盤岩が南の山体から急勾配で落ち込む盆地境界の北側に位置し、断層破壊が南の山体下を西から東に進んだこと(八木・菊池, 1999)<sup>16)</sup>

を考え合わせると、アダバザルに大きな被害(表層部を液状化させるような強振動)をもたらした原因として、兵庫県南部地震における神戸・阪神地域の被害集中の原因と考えられている地震波の到来方向、盆地境界で生成される波と直達S波の干渉、フォーカシングなどが想起される。

Adapazari Gravity Basement  
3D view from WNW (dip:30 deg)

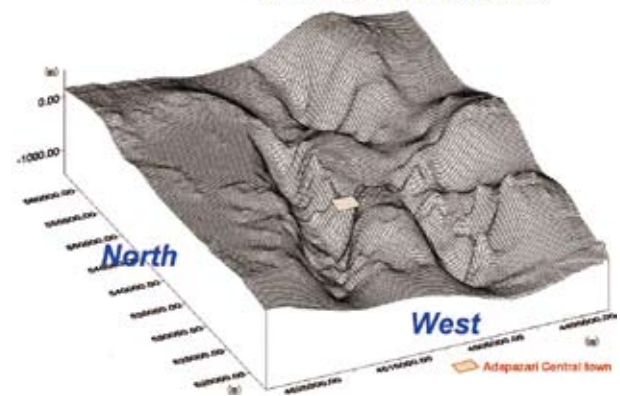


図-14 アダバザル周辺の重力基盤の鳥瞰図

Fig. 14 Bird's eye view of gravity basement around Adapazari.



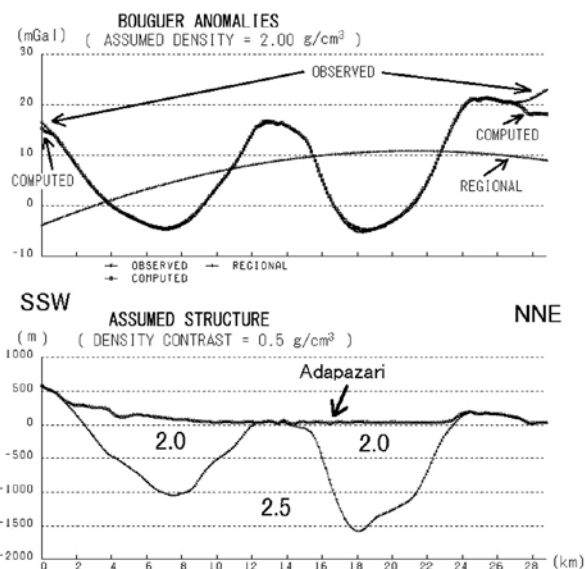


図-15 アダパザルをとおり2次元の重力自動解析。解析断面は、図-13を参照。密度差は $0.5 \text{ g/cm}^3$ 。

Fig. 15 2-D automatic analysis across Adapazari. Profile is shown in Fig.13. Density contrast :  $0.5 \text{ g/cm}^3$ .

#### 4. 重力基盤からの地震波エネルギー集中の考察

海外の二つの地震調査の事例から、地震被害の局地性が重力基盤と関連を持つことを示した。基盤構造に起因して地震動が増幅されることは、定性的に理解でき、阪神—淡路大震災の際に神戸市内に現れた震災の帯の観測例からも説明することができる。Nishimura et al. (2012)<sup>17)</sup>は、重力基盤を構造モデルに設定して3次元波線理論を用いて地表における地震波エネルギー集中度を見積もっている。これは、重力基盤の有効利用として極めて重要と考えるので、ここで紹介する。

Nishimura et al. (2012)<sup>17)</sup>は、岡山平野で精緻な重力調査を行い図117に示す重力基盤図を作成した。次に重力基盤図にもとづく均質2層構造モデルを仮定し、基盤に入射した平面S波が屈折して地表に到達する過程を3次元波線理論を用いて追跡した。計算方法は、赤松ほか(2006)<sup>18)</sup>を適用した。各層に与えたパラメータは以下のとおりである。

P波速度：堆積層  $1,800 \text{ m/s}$ 、基盤  $4,600 \text{ m/s}$

S波速度：堆積層  $600 \text{ m/s}$ 、基盤  $2,500 \text{ m/s}$

密度：堆積層  $2.20 \text{ g/cm}^3$ 、基盤  $2.60 \text{ g/cm}^3$

計算結果を図-18に示す。これは、水島・玉島地区からみた想定南海地震震源域の方位 ( $115^\circ \sim 210^\circ$ ) を  $2.5^\circ$  刻みに分割し、各方位から入射角  $30^\circ$  で基盤に入射した平面S波が地表の各点に集中する様子を表したものである。格子点間隔を  $100 \text{ m}$  とし、各格子点から半径  $100 \text{ m}$  以内に各方位から到達するS波のエネルギーの最大値が、カラースケールで示されている。図-17の基盤構造と見比べると、基盤の傾斜が大きい

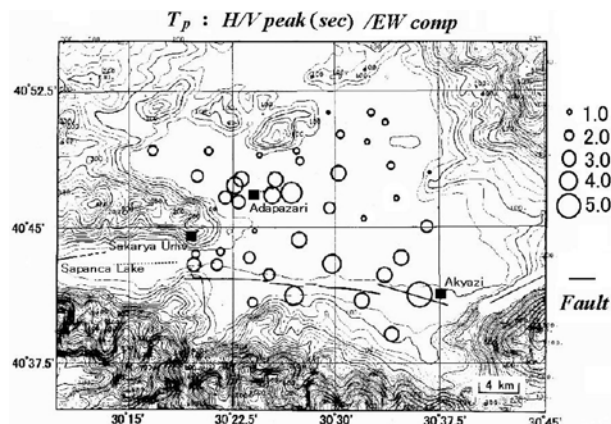


図-16 長周期ピーク周期  $T_p$  (H/V：東西/上下) の分布。実線は地上で現れた断層地裂 (USGS, 1999)<sup>13)</sup>。地形は GTOPO-30 による ( $25 \text{ m}$  コントア)。

Fig. 16 Distribution of  $T_p$  of H/V (EW/UD). Thick line shows surface rupture observed by USGS (1999)<sup>13)</sup>. Contour is shown in  $25 \text{ m}$  interval from GTOPO-30.

区域と深度が大きい区域に地震波エネルギーが集まっていることがわかる。一方、傾斜の大きいところでも基盤が浅い方は地震波エネルギー集中が少ないのは特筆すべき点である。この結果は、麗江とアダパザルの地震被害の局地性とも整合しており、重力基盤構造から地震被害分布を定量的に推定できる可能性を示唆している。

#### 5. まとめ

中国雲南省麗江盆地においては、断層系と関連の強い盆地の基盤構造に起因する特異な地震被害分布が生じている。トルコ・アダパザルは、北アナトリア断層系の活発な造構運動、盆地の複雑な基盤構造、著しく軟弱な表層地質などが複合して、地震災害を受けやすい場に立地する都市であると言える。

重力異常の分布から麗江盆地とアダパザル盆地の3次元的な基盤構造を議論した。岡山平野の重力基盤から地震波のエネルギー集中度が計算でき、基盤の傾斜が大きい区域 (特に、基盤が深くなっている方) と深度が大きい区域に地震波エネルギーが集まることを紹介した。今後、地震波のエネルギー集中度の計算例を増やし、過去の地震被害との比較例を蓄積することが重要である。また、ハザードマップの精度向上にも重力基盤の有効利用が期待される。



図-17 岡山地域の重力基盤のレリーフ図 (Nishimura et al., 2012)<sup>17)</sup>  
 Fig. 17 Relief map showing 3D gravity basement topography of Okayama area.

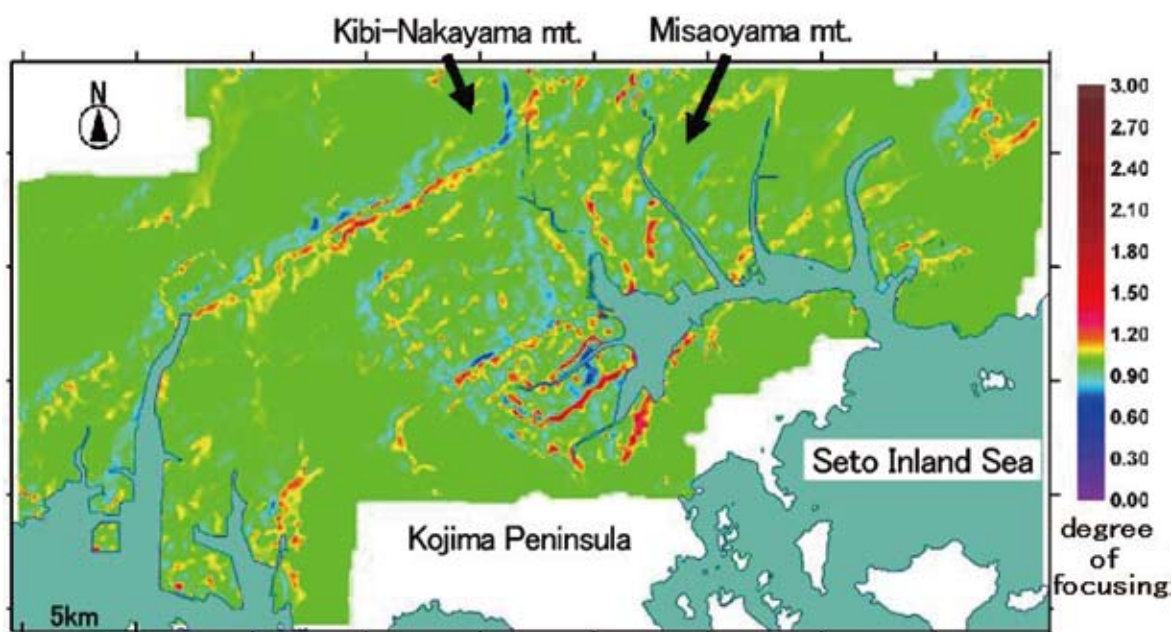


図-18 1946年昭和南海地震の震源域よりの地震波のエネルギー集中度分布 (Nishimura et al., 2012)<sup>17)</sup>  
 Fig. 18 Distribution of the degree of focusing or defocusing of seismic rays arriving from the source area of the 1946 Nankai earthquake.

## 参 考 文 献

- 1) 駒澤正夫 (1998):物理探査ハンドブック, 手法編第8章, 433-471, 物理探査学会編.
- 2) TALWANI, M., WOZEL, J. and LANDISMAN, M. (1959): Rapid computation for two dimensional Bodies with application to Mendocino Submarine Fracture Zone. *J. Geophysics Res.*, **64**, 49-59. 1).
- 3) Komazawa, M.(1995): Gravimetric Analysis of Aso Volcano and its Interpretation, *J. Geod. Soc. Japan*, **41**, 17-45.
- 4) 駒澤正夫・中村佳重郎・赤松純平・蔣 楽群・蔡紹平・李 康龍・趙 志光・西村敬一・盛川 仁・尾上謙介・瀬戸憲彦(2000):中国雲南省麗江盆地の重力基盤構造—1996年麗江地震の被害分布と重力構造—, 京大防災研年報, no. 43, B-1, 67-74.
- 5) NASA (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>): Shuttle Radar Topography Mission(SRTM-DEM). [閲覧日2014年1月5日]
- 6) 駒澤正夫(1988):仮想扇形地形による重力地形補正法, 測地学会誌, **34**, 11-23.
- 7) 西村敬一・瀬戸憲彦・中村正夫・駒澤正夫・盛川 仁・尾上謙介・赤松純平(1999):爆破地震探査と重力異常から見た中国雲南省屈江盆地の地下構造, 京大防災研研究集会(10-K2)「都市圏における地質環境の変遷と地震動災害(代表:稔井久)」報告書, 218-227.
- 8) 赤松純平・盛川 仁・西村敬一・尾上謙介・蔣 楽群・羅 奇峰・中村正夫(1998):脈動から推定された中国雲南省麗江盆地の基盤構造—1996年麗江地震(M7.0)による被害との関係—, 京大防災研年報, no. 41, B-1, 111-117.
- 9) Kusuda, T. and Nakamura, M.(1977): Outline of geology. In : Akamatsu, J. (ed): Lijiang Earthquake in Yunnan, China, of February 3, 1996. Reconnaissance Report, Res. Rep. for Res. Proj. Grant-in-Aid for Scientific Res. (GrantNo.07300028), 61-67.
- 10) 国家地震局地質研究所・雲南省地震局(1990): 第4章 活動断層, 滇西北地区断層, 地震出版社, 北京, 69-128.
- 11) Jiang, L (1997): Comparison of microtremors with distribution of severe damage in Lijiang city. : J. Akamatsu(ed): Lijiang Earthquake in Yunnan, China, of February 3, 1996. Reconnaissance Report, Res. Rep. for Res. Proj. Grant-in-Aid for Scientific Res.(Grant No.07300028), 143-146.
- 12) Nakagawa, K., Shiono, K., Inoue, N. and Sano, M. (1996): Geological characteristics and problems in and around Osaka basin as a basis for assessment of seismic Hazard, Special Issue of Soil and Foundation, 15-28.
- 13) 小玉喜三郎(1996):基盤断層の再活動特性からみた異常振動帯, 京大防災研・都市耐震センター研究報告, 別冊18号. 27-36.
- 14) Komazawa, M., Morikawa, H., Nakamura, K., Akamatsu, J., Nishimura, K., Sawada, S., Erkene, A. and Onalp, A. (2002): Bedrock structure in Adapazari, Turkey – A possible cause of severe damage by the 1999 Kocaeli Earthquake –, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 829-836.
- 15) USGS(1999): Implication for Earthquake Risk Reduction in the United States from Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999. USGS Circular 1193.
- 16) 八木勇治・菊池正幸(1999):1999年8月17日トルコの地震の震源過程, 地震学会予稿集(秋季), A70.
- 17) Nishimura, K., Akamatsu, J. and Komazawa, M. (2012): 3D bedrock structure of Okayama plain, west Japan, as inferred from gravity anomalies and its relation to damage distribution during the 1946, M8.0, Nankai earthquake. Proceedings of 15th World Conference in Earthquake Engineering, 1334.
- 18) 赤松純平・中村佳重郎・西村敬一・駒澤正夫(2006):大阪盆地北東部の3D 重力基盤構造による地震動増幅域, 第25回日本自然災害学会学術講演概要集, 45-46.