

## 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 —

駒澤正夫\*・中村佳重郎\*\*・赤松純平\*\*・蔣 榮群\*\*\*・蔡 紹平\*\*\*・  
李 康龍\*\*\*\*・趙 志光\*\*\*\*・西村敬一\*\*\*\*\*・盛川 仁\*\*\*\*\*・尾上謙介\*\*・瀬戸憲彦\*\*\*\*\*

\*地質調査所地殻物理部

\*\*京都大学防災研究所

\*\*\*雲南省地震局

\*\*\*\*麗江県地震局

\*\*\*\*\*岡山理科大学総合情報学部

\*\*\*\*\*鳥取大学工学部

\*\*\*\*\*東京大学地震研究所

### 要 旨

得られた重力異常は南北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盆地とすることができる。地震被害の大きかった盆地南部を北東-南西に切る麗江-劍川断層については、明瞭な構造は見いだされなかった。一方、南北に延びた地溝状低重力帯の西側は東側に比べ大きな勾配を持っており雪山断層にほぼ対比でき、地震断層(活断層)が想定できるかも知れない。解析結果から堆積層の最大の厚さは2kmに達すると見積もられ、その形状は微動観測データや屈折法地震探査との結果とも概略調和的である。

キーワード：重力基盤，麗江-劍川断層，地震被害の地域性，基盤構造

### 1. はじめに

中国雲南省麗江で1996年2月3日に起きたM7地震(麗江地震)は、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10kmも離れたところにあることや、過去の地震についても似たような被害分布の地域性が見られる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、脈動観測を1997年8月に、地震探査と重力探査を1998年8月に、更に精密重力調査を盆地の北端部の玉龍雪山までの広範囲を1999年8月に実施した。本論では重力調査に基づいた解析結果を述べ、他の調査結果との比較・検証を行う。また、

重力の解析結果と地震動の地域性との関係についても考察を行う。

### 2. 重力調査とデータ処理

1998年8月と1999年8月に実施した重力調査の測定ポイントの総数は390点に達した。測点図を、地形図と併せてFig.1に示す。1998年には、盆地中-南部の130点で、そのうち70点については、同時に実施した屈折法地震探査の観測点上に取られている。使用した重力計は、LaCoste & Romberg G型911であったが、調査全般をとおして0.1mGal/日を越すなどドリフトがやや大きい傾向はあったが、重力異常を求め

るには問題にならないものである。1999 年には、盆地北部、麗江-剣川断層及び盆地北西部の玉龍雪山中腹など盆地外縁部の山地で測定を行った。測点数は 260 点程であった。使用した重力計は、LaCoste & Romberg G 型 304 と 605 の 2 機であったが、両機ともドリフトは極めて小さく問題にならなかった。

位置と標高は Magellan ProMark X-CM によるディファレンシャル GPS によって決定した。相対精度は、位置、標高とも数 10cm から 1m 以内にあり今回の調査仕様には十分な精度をもつ。ディファレンシャル GPS の処理に用いた基準点の絶対位置座標(緯経度)は、ノーマル GPS の連続測定による結果を平均化することで精度の向上を計った。基点での測定時間は 2 秒サンプリングで 8~10 時間で、測定結果の再現性から誤差は数メートル程度と見積られる。測地系は WGS84 を採用した。標高については、今回は三角点や水準点を利用できなかったため以下のような方法を取った。ディファレンシャル GPS で暫定的に決めた標高値が地形図(1/5 万)から読みとったコンターのデジタル値と最小自乗的に最もフィットするようにバイアス調整をして、基準点の標高値を決めた。地形図(1/5 万)の座標系はベッセル楕円体に基づく東京測地系となっているが、地形図の示す位置座標は WGS84 に極めて近く誤差は

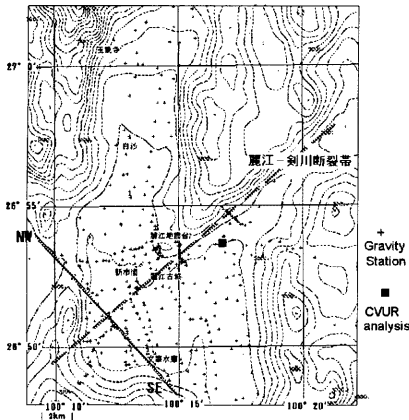


Fig.1 Gravity stations with cross marks and brief topography. Contour interval is 100m. NW-SE is a profile of 2-D gravity analysis.

数 10 メートル程度であった。測量原点が世界測地系と誤差なく設定されていたためと思われる。

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(4km まで)を補正するためのもので精度とメッシュ間隔の小さいものが必要で、地形情報は 1/5 万地形図を基にした。1/5 万地形図と広域地形図を画像データとしてパソコンに取り込み、コンターをトレースしてデジタルデータを発生させる。そのデータに重力測定点の座標データも加え入力ランダムデータとし、局所領域に重み付きの二次曲面近似をそのデータに適用してメッシュ点の値を計算した。メッシュ間隔は 125m とした。もうひとつは、測点から離れた地形(4~60km)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、公開メッシュデータである gtopo-30 の 30 x 30 のメッシュデータを用いた。測点間隔は 1km 弱で、座標系も WGS84 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判った。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)。重力値は国際重力基準網(IGSN71)に接続し、正規重力値は 1980 式で計算した。

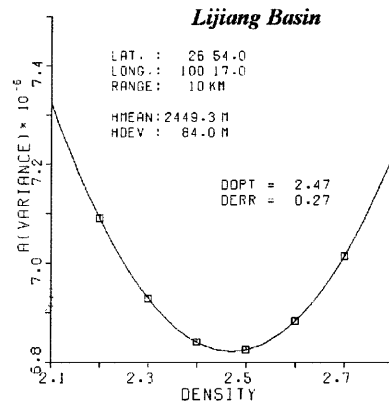


Fig.2 Density estimation of surface layer by CVUR method. The suitable density is 2.47g/cm<sup>3</sup>. The site of estimation is around the eastern hill region of basin.

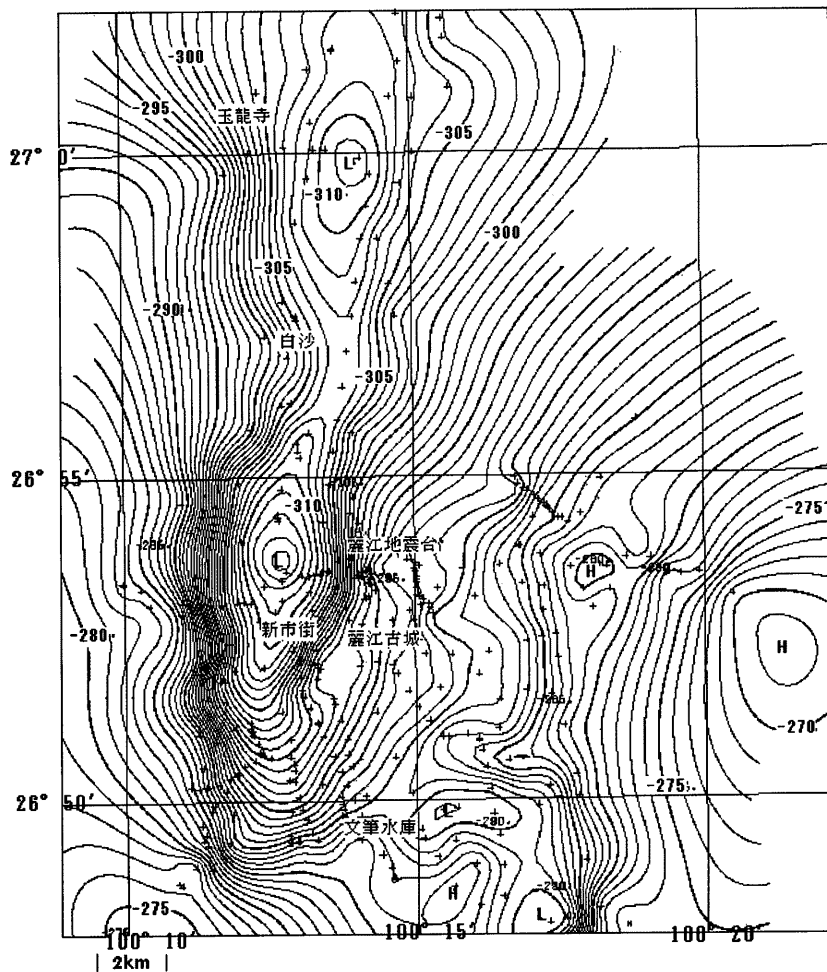
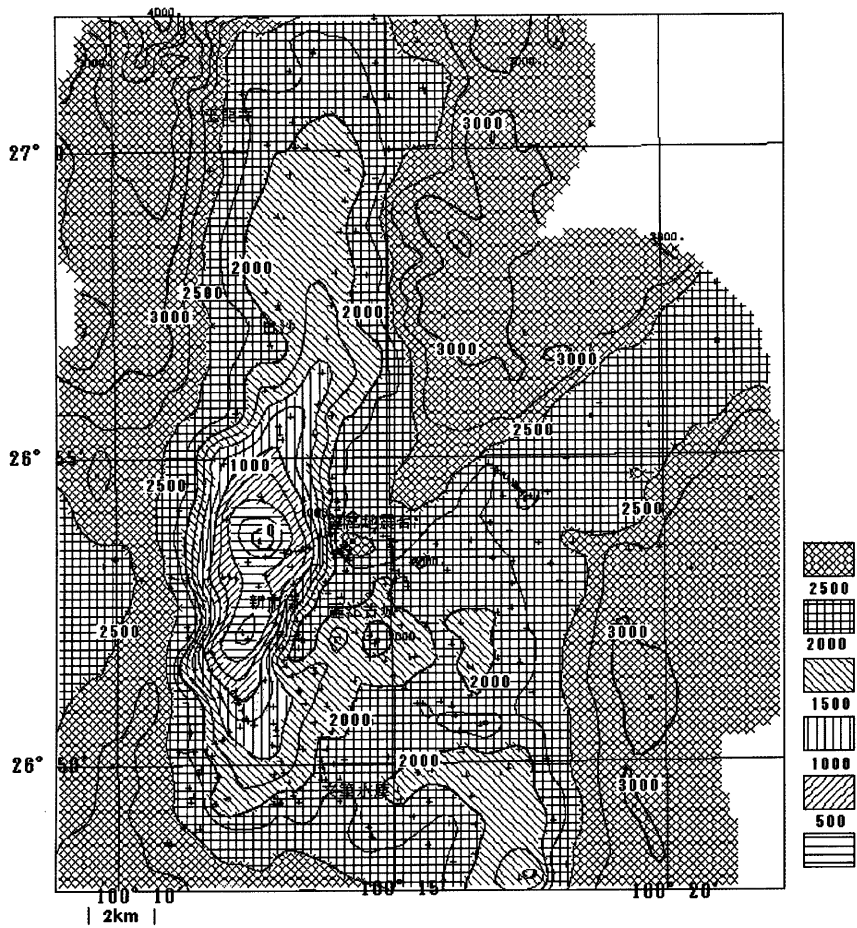


Fig.3 Bouguer Anomalies of Lijiang Basin. Contour interval is 1mgal.

Assumed Density is  $2.5\text{g}/\text{cm}^3$



**Fig.4** Gravity Basement of Lijiang Basin. Density contrast is  $0.5\text{g}/\text{cm}^3$  by assuming that basement is  $2.5\text{g}/\text{cm}^3$  and sedimentary layer is  $2.0\text{g}/\text{cm}^3$ . Contour interval is 250m.

The gravity basement is shown with the value of above sea level in meter.

### 3. ブーゲー異常の特徴

調査域は盆地堆積物が厚く堆積している地域で、表層密度は地質的に低いと考えられる。しかし、王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。また、盆地外縁部の山間部・丘陵域については堆積層の密度を仮定すると地形との相関が表れてしまうので、基盤構造を反映した重力異常は得られなくなる。以上のように、各種の地質ブロックの密度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地形の起伏による影響が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示すことにする。

山間部・丘陵域の密度推定には「上方接続残差分散比較法(Comparison of Variance of Upward Residual: CVUR 法)」(Komazawa, 1995)を用いた。本調査域の地形の起伏があまり大きくないため面的な密度マッピングは行わず、麗江古城東方の丘陵地についての解析結果を用いた。Fig. 2 に示した解析結果見ると、盆地外縁部の山間部・丘陵域の密度は  $2.5\text{g/cm}^3$  程度と思われる。Fig. 3 に仮定密度  $2.5\text{g/cm}^3$  のブーゲー異常を示す。コンター間隔は  $1\text{mGal}$  で、 $5\text{mGal}$  毎に太線で描かれている。重力異常は、先ず盆地の形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。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、両側の山体に向かって重力異常値は急増する。盆地の北部、北緯  $27^\circ$  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ので、その規模や形状は明らかでない。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、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、盆地形成の後横ずれ的な造構運動があったことを示している。

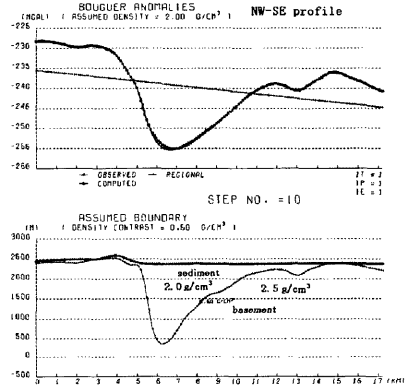


Fig.5 2D automatic analysis of NW-SE profile. Density is assumed that basement is  $2.5\text{g/cm}^3$  and sedimentary layer is  $2.0\text{g/cm}^3$ .

### 4. 重力解析

重力異常から盆地の基盤構造を推定するために重力の3次元解析を行った。方法は、基盤もしくは表層を多数の角柱で表現し、それらの重力効果を観測値に反復修正してマッチングさせていく自動解析である。基盤と表層(堆積層)の密度を与えねばならないが、いまのところ岩石サンプル密度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結果から  $2.5\text{g/cm}^3$  を、堆積層の密度は一般的に堆積層の密度として使われる  $2.0\text{g/cm}^3$  を仮定した。今回は、観測データとしては、仮定密度  $2.5\text{g/cm}^3$  のブーゲー異常を用いた。この密度のブーゲー異常を用いるメリットは、既に地形効果が地形補正によって除去されているため地表付近での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。解析結果の重力基盤を標高表示で Fig. 4 に示す。コンター間隔は  $250\text{m}$  である。盆地中央を南北に伸びる深い谷状構造が顕著で、麗江地震台西方  $1.5\text{km}$  付近で最深になっている。示深度では、 $2400\text{m}$  に達している。その南方  $3.5\text{km}$  付近には局所的な窪みが見られ深度は  $2200\text{m}$  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り、特に、西側では山体との落差も含めると大き

な勾配と言える。東側については、麗江地震台から麗江古城については大きな勾配になっているが、それ以外については西側に比べ勾配は緩やかに見える。

Fig. 5 に盆地南西部を横切る測線で2次元の自動解析を行った結果を示す。この測線は、1998 年に実施された地震探査(西村ほか, 1999)の測線に一致している。この結果でも西側での基盤の落ち込みの勾配が大きいことを示している。

### 5. 議論

まず、重力異常の南北に延びる低重力異常帯は、盆地が大きな地溝帯に発達したことを示唆している。盆地の基盤は、ひとつの凹地ではなく、南北に細長く連なる2つの大きい凹地、及びこの南東側の支盆地の凹地から形成されるようである。

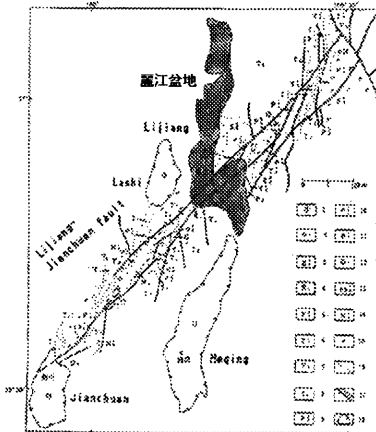


Fig.6 Geological structure of Lijiang-Jianchuan fault (Fig.4-23 in Geological Institute, SSB and YSB,1990).

以上のことと脈動 H/V スペクトル比のピーク周期の分布(赤松ほか, 1998)は興味深い。すなわち、ピーク周期は、北側の凹地中央部では 0.9 秒であるが、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、

玉龍雪山からの主に玄武岩質の礫の多い更新世の水河堆積物であるが、南側の凹地に対応する盆地中～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)。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帯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)ので、雪山断層に関係する盆地境界の構造を反映したと思われる。

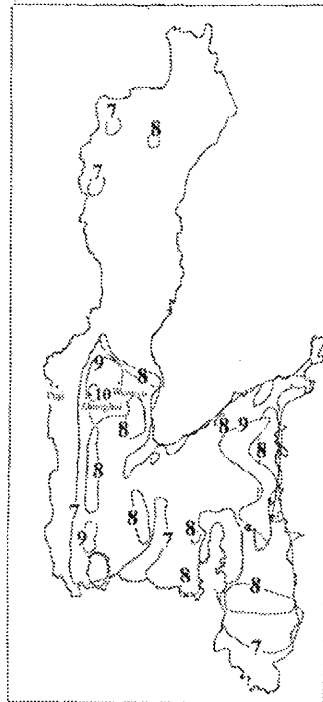


Fig.7 Distribution of intensity (MM) in the Lijiang basin for the 1996 Lijiang Earthquake.

次に、麗江-劍川断層に関しては盆地内だけでは

なく盆地東部の山体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)。Fig.6 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イメージできる。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集中被害との関連を検討する。Fig.7 は主として建物被害から求められた震度分布である。特徴として、①盆地西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係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., 1996) 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、カップルドされていない基盤岩の異常震動(小玉, 1996)などが関係したのではないかと推測される。

## 6. まとめ

重力異常の分布から麗江盆地の3次元的な基盤構造を議論した。现阶段では、予察の域をでないが、重力異常の結果は、総体的には脈動観測や地震探査の結果と調和する。地溝帯に発達した麗江盆地が麗江—劍川断層の活動により左横ずれのオフセットを形成したとするイメージを描いたが、もしそうであるなら、地震被害分布—地震動特性—が地質構造の発達に大きく依存している事例として大変興味深い。この観点からも、盆地基盤構造のモデル化とその形成過程の調査を進める必要がある。

## 謝辞

重力調査に際しては、雲南省地震局と麗江県地震局のスタッフ、とりわけ、張 学聖局長と和麗軍氏には多大のご協力を頂いた。記して深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 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, 41B-1, 111-117.
- 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.
- 国家地震局地質研究所・雲南省地震局(1990): 第4章 活動断層, 填西北地区断層, 地震出版社, 北京, 69-128.
- 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, p. 11-23.
- 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麗江盆地の地下構造, 京大防災研研究集会(10K-2)「都市圏における地質環境の変遷と地震動災害(代表: 楡井 久)」報告書, 218-227.
- Jiang, L. (1997): Comparison of microtremors with distribution of severe damage in Lijiang city. In: 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.
- Komazawa, M. (1995): Gravimetric Analysis of Aso Volcano and its Interpretation, J. Geod. Soc. Japan, 41, 17-45.
- 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. (Grant

## Gravity Basement Structure of Lijiang Basin in Yunnan Province, China

Masao KOMAZAWA<sup>\*</sup>, Kajuro NAKAMURA<sup>\*\*</sup>, Junpei AKAMATSU<sup>\*\*</sup>, Lequn JIANG<sup>\*\*\*</sup>,  
Shaoping CAI<sup>\*\*\*</sup>, Kanlong LI<sup>\*\*\*\*</sup>, Zhiguan ZHAO<sup>\*\*\*\*</sup>, Keiichi NISHIMURA<sup>\*\*\*\*\*</sup>,  
Hitoshi MORIKAWA<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Kensuke ONOUE<sup>\*\*</sup>, Norihiko SETO<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Geological Survey of Japan

<sup>\*\*</sup>Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,

<sup>\*\*\*</sup>Seismological Bureau of Yunnan Province

<sup>\*\*\*\*</sup>Seismological Bureau of Lijiang Prefecture

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Faculty of Informatics, Okayama University of Science

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Faculty of Engineering, Tottori University

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

### Synopsis

The feature of Bouguer anomalies is characterized by the low anomaly elongated in north and south, which corresponds to a big graben structure. The clear gradient structure derived from the active fault, Lijiang - Jianchuan Fault, was not found from the gravity anomalies. The thickness of sedimentary layer is more than 2km from 3-D gravity analysis, and the shape of gravity basement is similar to the results of microtremors and seismic-refraction exploration.

Keywords: gravity basement, Lijiang-Jianchuan fault, damage distribution, bedrock structure