

中国雲南省麗江盆地の地形-地質構造と盆地形成メカニズム

矢野孝雄¹⁾・赤松純平・李 康龍²⁾・西村敬一³⁾・蔣 楽群⁴⁾・
駒澤正夫⁵⁾・中村佳重郎・盛川 仁⁶⁾・坂井公俊⁶⁾・宇田川鎮生⁶⁾

¹⁾鳥取大学地域学部

²⁾麗江県地震局

³⁾岡山理科大学総合情報学部

⁴⁾雲南省地震局

⁵⁾産業技術総合研究所地質情報部門

⁶⁾東京工業大学大学院総合理工学研究科

要 旨

雲南省北西部の大理-麗江地区は青藏高原から雲貴高原への移行部にあたり、山間盆地が集中して分布する。それらのうち最北部に位置する麗江盆地の形成メカニズムが、地形-地質特性、活断層、および広域活構造にもとづいて解明される。麗江盆地および周辺域には8条の活断層が認定され、南-北方向の活断層には縦ずれ変位が、北東-南西方向の断層には左横ずれ変位が、それぞれ卓越する。共存するこれらの活断層が示す応力場は、 $\sigma_3 = E-W$, $\sigma_2 / \sigma_1 = N-S$ /鉛直, $[\sigma_3] < [\sigma_2] \sim [\sigma_1]$ である。すなわち、 σ_1 が鉛直方向にある期間には地溝が形成され、 σ_1 が水平方向にある期間には横ずれ変形が進行して、麗江盆地および周辺域の変動地形が形成された。広域活構造の解析結果は、大理-麗江地区の山間盆地群が、北北西-南南東方向の右横ずれ master faults (中甸および紅河-哀牢山断層系) の右 stepping に生じた大規模プリアパート盆地 (幅100km, 長さ75km) 中に形成された地溝群であることを示す。プリアパート盆地の形成にかかわる広域応力場としては、北北西-南南東方向の σ_1 および東北東-西南西方向の σ_3 が想定される。麗江盆地周辺における応力方位の転換は、プリアパート盆地内部への広域応力場の直達 (横ずれ変形時相) と、その結果生じる master faults の変位によるプリアパート盆地の伸長 (地溝形成時相) に由来する可能性がある。

キーワード: 雲南省, 麗江盆地, 活断層, 応力場, プリアパート盆地

1. まえがき

雲南省北西部は、青蔵 (チベット) 高原から雲貴高原への移行部にあたる (Fig. 1)。北北西に高く、南南東へ低く、高原の平均高度は4,000mから2,000mへ下る。この地域は、東アジア南部の3大河川一長

江、メコン川、およびサルウィン川一が相互に40kmの間隔まで近接して並流する「三江地帯」にあたり、高原面が深く下刻されてできた大峡谷地帯は「地球の皺」ともよばれる。そのうち、大理-麗江地区 (25° ~ 27° N および 99.5° ~ 101° E) には多くの山間盆地が集中的に分布し、いくつかの湖盆を擁する

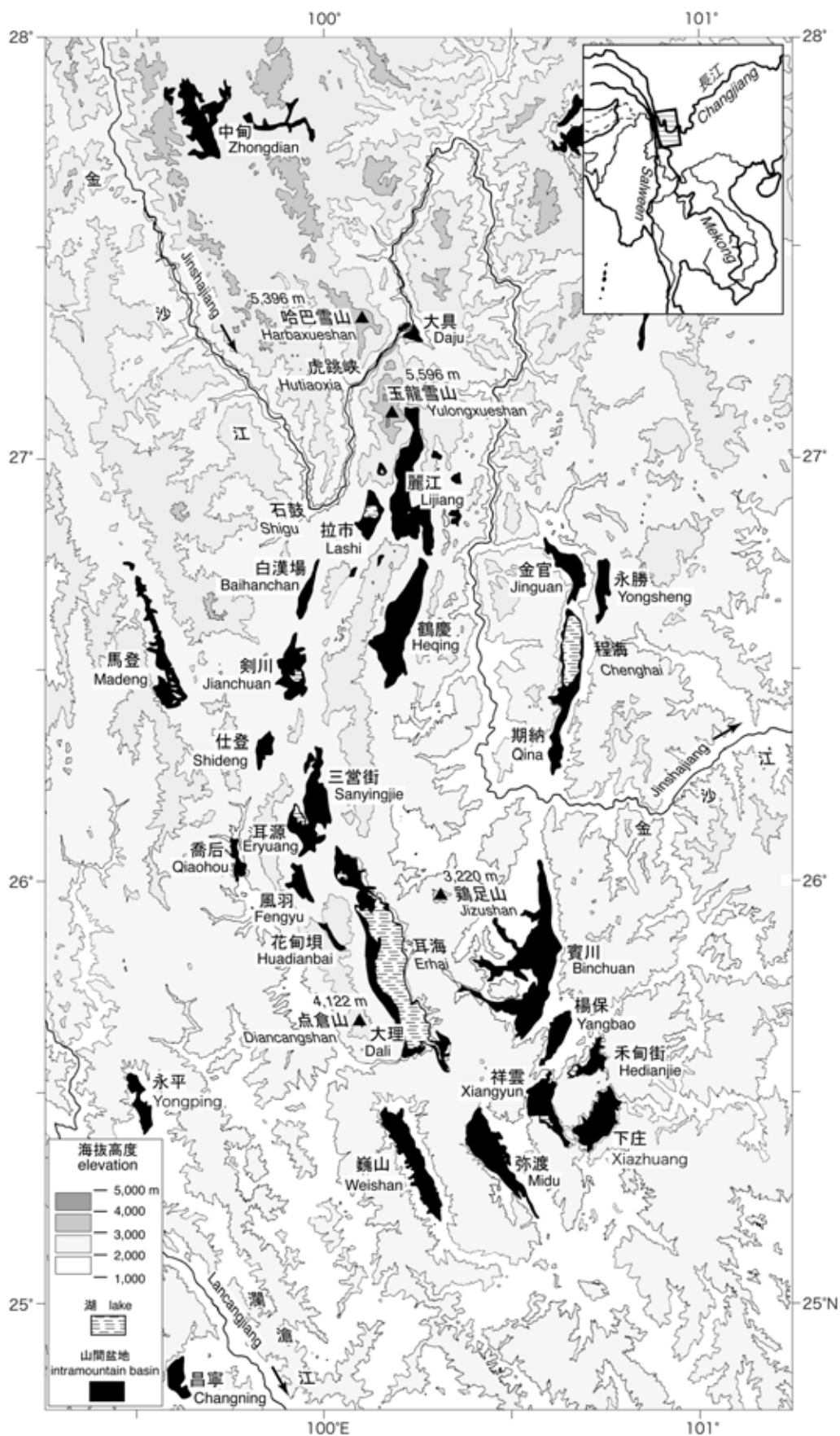


Fig. 1 Distribution of intramountain basins in and around the Dali-Lijiang area, northwestern Yunnan, China. Topographic contours from the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 3" mesh data of NASA <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>.

(Fig. 1)。低平な盆地地面は、集中的な土地利用がはかられ、大理-麗江地区は雲南省北西部の社会-経済的要地となっている。これらの山間盆地群は活発な地殻変動に由来するものであり、地域の人々は、土地の集約的利用が可能であるいっぽうで、歴史的には多くの地震被害にみまわれてきた (Fig. 2)。大理-麗江地区は 1982 年に「滇西地震預報実験場」(総面積 3 万 km²) に指定され、国際共同研究を含めた幅広い地震予知研究が展開され、いくつかの大地震の長期 (10 年程度)、短期 (3 ヶ月) あるいは直前予報に成功している (劉ほか, 2002)。

1996 年 2 月 3 日に発生した麗江地震 (M7.0) の直後に、文部省科学研究費 (突発災害) の援助を受けて日本からの調査団が組織され、国際共同調査が実施された (Akamatsu, 1997)。この調査は、その後、国際防災十年特別事業 (1994-1998) および科学研究費補助金 (2002-2004 年: 赤松, 2005) による海外調査に引き継がれ、マイクロゾーニングを目的とした総合的な地球物理学的研究 (微小地震観測, 微動観測, 屈折法地震探査, 重力探査, GPS 地殻変動観測, 衛星画像解析, 地形-地質調査など) が行なわれた。本研究は、その一環として実施された活断層



Fig. 2 Shop pillar with a residual tilt of seismic damage, reinforced with wedge boards on the both side, in the Old Town of Lijiang (a World Cultural Heritage), Lijiang, northwestern Yunnan.

調査の成果と広域的活構造解析にもとづいて、麗江盆地をはじめとする山間盆地群の形成メカニズムを解明しようとするものである。

2. 麗江盆地および周辺域の地形-地質特性

麗江盆地は、大理-麗江地区の最北部 (27° N 付近) に位置する南北方向に伸長した山間盆地である (Fig. 1)。麗江盆地および周辺域の地形-地質特性は、次のようにまとめられる。

2.1 地形特性

麗江盆地および周辺域の地形は、4 つの要素 — 山岳 [海拔 5,500~3,000m], 高原 [3,200~2,500m], 山間盆地 [3,000~2,200m], および河谷 [1,800~1,300m] — で構成されている (Figs. 1 and 3)。山岳は北西部に位置し、哈巴雪山 (5,396m) と玉龍雪山 (5,596m) をいただく哈巴-玉龍山塊をつくる。山塊の主稜線は北方へ延び、西藏高原南東部の沙魯里山脈へ連なる。高原は、北東部の九子海、南西部の太安~南溪、および南東部の龍山をそれぞれ中心とする 3 つの高原からなる。高原は顕著な定高性を示し、高原面の起伏は緩やかである。山間盆地のうち主なものは、麗江、拉市および鶴慶盆地である。山間盆地と山岳・高原との境界はほとんどの場合、直線的な急崖~急斜面になっていて、比高は数 100~1,500m に達する。これらの主要盆地のほか、小規模な盆地が山岳内部 (文海) や高原上 (九子海, 南溪, 龍山) に、そして断層帯中 (大具, 文化, 白漢場) に存在する。金沙江の河谷は、麗江盆地をとりまく周辺域を深く下刻した長大な V 字谷をつくる。西藏高原から南南東流する金沙江は、麗江西方の石鼓で大きく転流し (天下第一弯: 吳, 1992), 北北東流した後、東縁部を北から南へ貫流する。河谷底と高原面との比高は一般に 1,500~2,500m であるが、金沙江が山岳部を斜断する虎跳峡では、哈巴雪山と玉龍雪山の間に先行谷が穿たれ (Leloup et al., 1995), 山頂と谷底との比高は 3,900m に達する。

この論文の主要な研究対象である麗江盆地は、東西 4~5km, 南北 32km の狭長な山間盆地であり、南部は S 字状に湾曲するため、東西幅が 10km まで広がる (Fig. 3)。盆地の東西の斜面は比較的直線的な急崖~急斜面になっていて、比高は数 100~1,500m 以上に達する。詳細にみると、南-北方向のみならず、北東-南西および北西-南東方向の斜面が複雑に組み合わさって、盆地周縁の斜面ができあがっている。盆地の南東端は「玉龍関」とよばれる北西-南東方向の基盤隆起によって、南方の鶴慶盆地から隔てられ

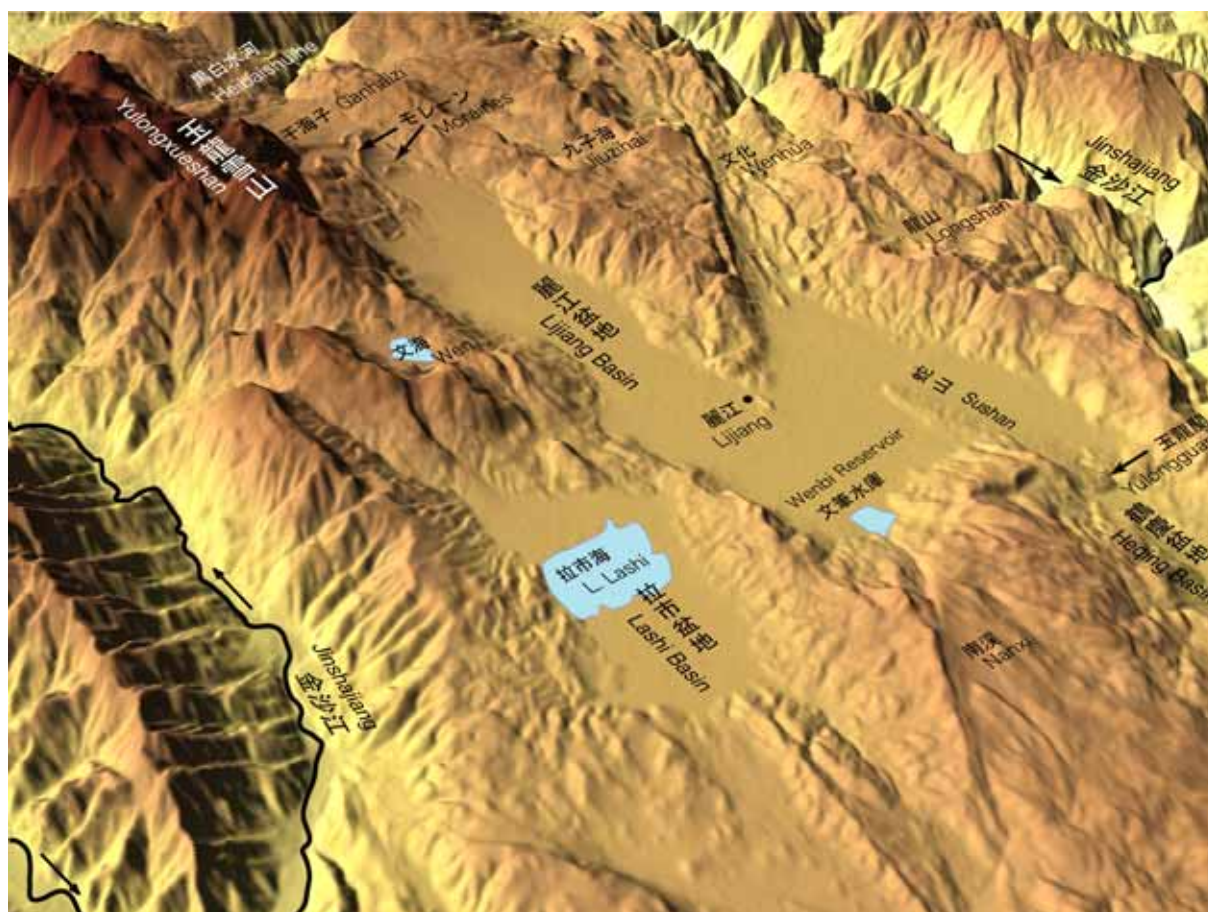


Fig. 3 3D-topographic image in and around the Lijiang Basin. Imaging from the SRTM 3" mesh data of NASA <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>, through KASHMIR <<http://www.kashmir3d.com/>> by Sugimoto, T.

る。いっぽう、麗江盆地の北端部は玉龍雪山から東へ突出する基盤隆起や氷河モレーン群に遮られ、狭窄部の北方は「干海子」とよばれる小盆地(東西 4km, 南北 5km)になっている。玉龍雪山から干海子へむかって、氷河アウトウォッシュ性の複合扇状地が発達する。干海子の北縁は黒白水によって解析されつつあり、この小盆地の北縁には、かつて黒白水を流下した谷氷河の右岸側サイドモレーンが、残されている (Fig. 3)。

麗江盆地の盆地面は 2,900~2,400m の海拔高度にあり、南へ緩く傾斜する。盆地の北部は平均勾配が 3° ~ 2° の複合扇状地帯であり、西縁にはより急勾配の大規模扇状地群が発達する。中部では盆地面がしだいに緩勾配になり、東西の山麓線は明瞭で、とくに東縁の山麓線は著しく直線的である。南部の盆地面は、海拔 2,400m 前後にひろがる沖積低地になっていて、著しく平坦である。沖積地の地下水面はきわめて浅く、とくに南半部では地表面近くにある。盆地南部の S 字状湾曲部へ向かって南から蛇山がの

び、比高 40~50m の低平な丘陵地をつくる。丘陵構成層は下部更新統の蛇山層であり、同様の丘陵地が蛇山から玉龍関まで連続している。

2.2 地質特性

麗江盆地および周辺域の地質は厚いシルル系~三疊系(浅海性石灰岩と碎屑岩: 最大積算層厚 13,000m)で構成され、そのうち上部二疊系は玄武岩類(最大層厚 3,900m)からなる(雲南省地質鉱産局, 1990)。始新統は陸成赤色岩相(紅層~雑色層: 最大層厚 2,100m)からなり、下位層を顕著な不整合で覆って散在的に分布する。始新統以下の地層群、とくにシルル系~三疊系は、褶曲や断層によって複雑に変形している。

これらの古期堆積岩類をほぼ水平に削剥した浸食小起伏面が前述した高原面であり (Fig. 3)、現在では海拔高度 3,000m 前後まで隆起し、「雲南準平原」あるいは「雲南高原面」とよばれる(任ほか, 1957)。高原面の形成年代は不明であるが、始新統の変形後、

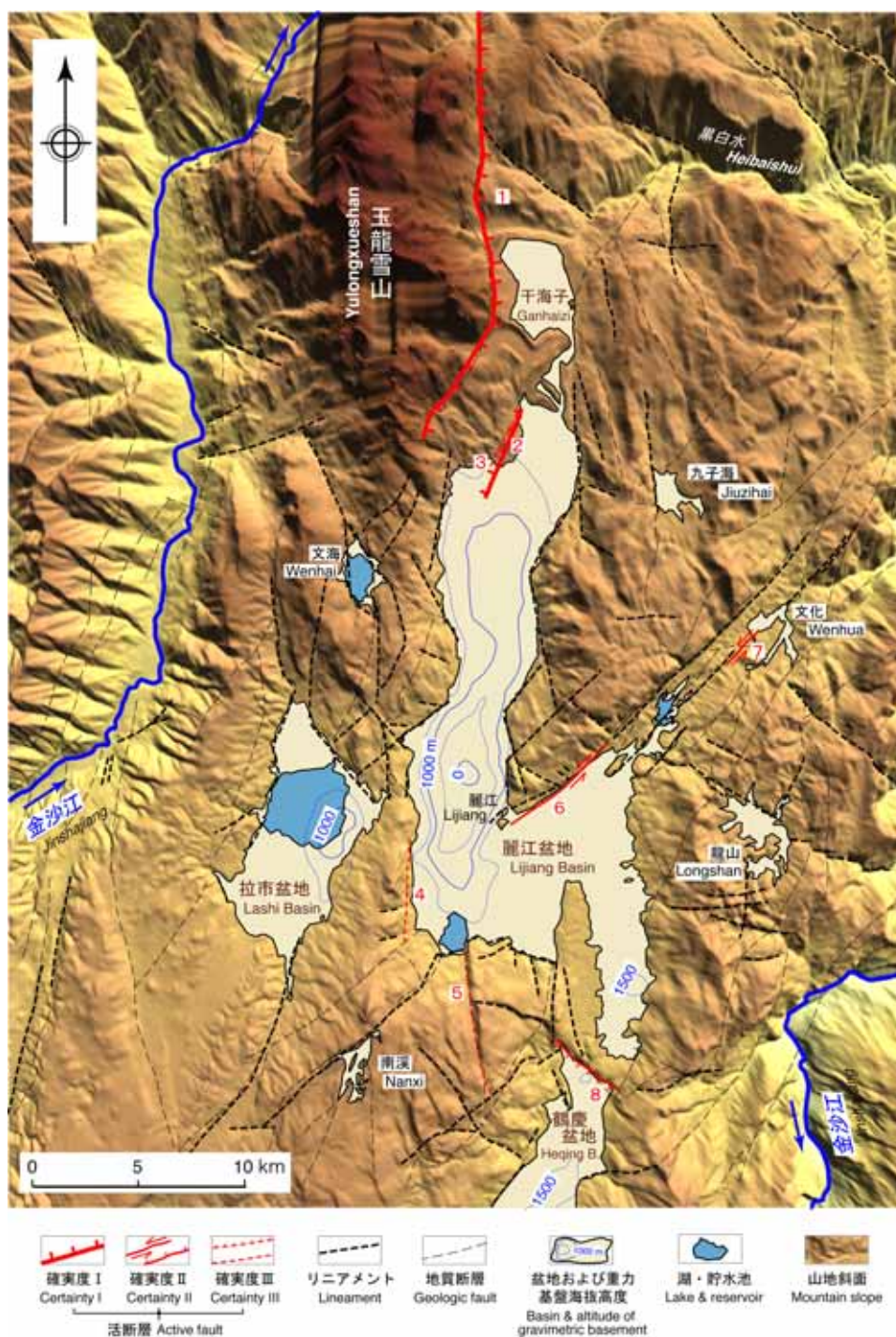


Fig. 4 Geomorphic-geologic structure in and around the Lijiang Basin. Geologic faults: Kusuda and Nakamura (1997), altitudinal contours of gravimetric basement under intramountain basins: Komazawa et al. (in press), topographic relief of mountain slope: imaged from SRTM through KASHIMIR.

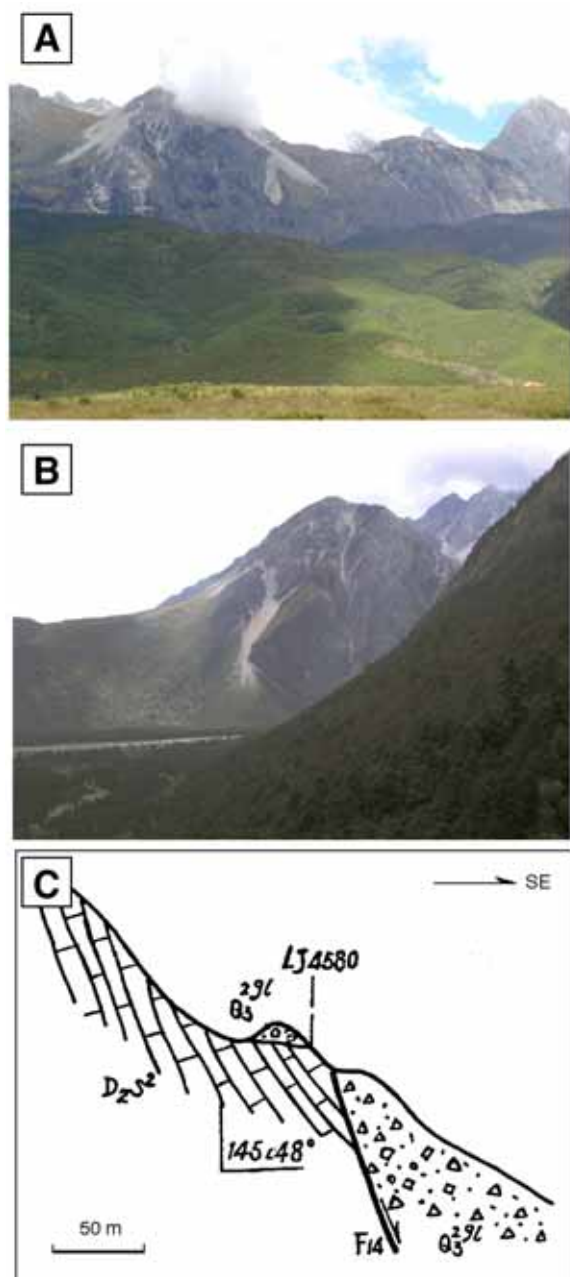
次に述べる山間盆地周辺に分布する鮮新統の堆積以前であることは確実である。

麗江盆地や隣接する拉市・鶴慶盆地の周縁の一部には、鮮新統の三営層（層厚＞230m）と下部更新統の蛇山層（層厚 190m）が分布し、ほぼ水平な堆積層

を形成する（雲南省地質局，1977）。これらは、山間盆地を埋積する堆積層の一部が盆地縁辺部に露出したものであり、山間盆地の発生がすくなくとも鮮新世のある時期まで遡ることを示す。麗江盆地を広く覆っている中部更新統～完新統は、河川性～氷河ア

ウトウオッシュ堆積物からなる。山岳部には氷河堆積物や氷河地形が残され（任ほか，1957），玉龍雪山と哈巴雪山には今日でも山岳氷河が懸り，北半球最南の氷河として著名である。

主要な構造方向は南-北，北西-南東および北東-南西方向であり，一部に東-西方向の構造要素もみられる。これらの構造方向は，始新統以下の古期堆積岩類を变形させる褶曲軸，地質断層，リニアメントのほか，直線的な急崖や急斜面，活断層などのネオテクトニクス期の構造要素にも表現されている。



3. 麗江盆地および周辺域の活断層

麗江盆地および周辺域には多くの地質断層やリニアメントが存在し，いくつかの活断層が認定される（Fig. 4）。地質断層は麗江-寧浪地域地質図（Kusuda and Nakamura, 1997）に従い，リニアメントの認定は衛星画像（ASTER 地形補正画像[レベル 3A01]）の立体視に拠った。活断層の認定には，現地での地形-地質調査ならびに既存文献資料を併用した。断層の確実度は，活断層研究会編（1980, 1991）にしたがって3段階（Ⅰ，ⅡおよびⅢ）に区分した。ちなみに，この区分方法の場合，平地と山地との境をなす大きな断層でも，確実な証拠がない限り，両側の地形面が異なるために確実度はⅡとなる場合が多い。また，山地内部では，適当な基準地形に乏しいために確実度Ⅰとは認定できない場合が多い（活断層研究会編，1991），という。

以下では，麗江盆地および周辺域における活断層を，南-北，北東-南西および北西-南東方向の3つの断裂系にわけて記述する。

3.1 南-北断裂系

麗江盆地および周辺域には，南-北方向の地質断層やリニアメントが多数存在する。それらのうち活断層として認定されたのは，次の5条である。

(1) 玉龍雪山東麓断層 [確実度Ⅰ]

玉龍雪山東麓断層は「玉龍山東側有巨大的断層」（任ほか，1957）と記述されたものであり，雲南省地質局（1977）の F_{14} ，呉（1992）と雲南省地震局・滇西地震予報実験場（1998）の玉龍山東麓断裂，

Fig. 5 Fault on East Piedmont of Yulongxueshan.

- A: Fault escarpment (a northwesterly view from Xiayuhu at the northwestern corner of the Lijiang Basin), the fault trace running between the upper cliff scarp (upper Paleozoic carbonates) and the lower vegetated slope (upper Permian basalts and lower to middle Triassic carbonates).
- B: Fault surface (southwesterly from the Ganhubai stream through the moraine hills to the north of the Lijiang Basin), bounding the Carboniferous carbonates on the right and the upper Permian basalts with vegetation in the middle.
- C: Fault displacement of moraine deposits at Chaluge on the east piedmont of the Yulongxueshan (Yunnan Geological Bureau, 1977).

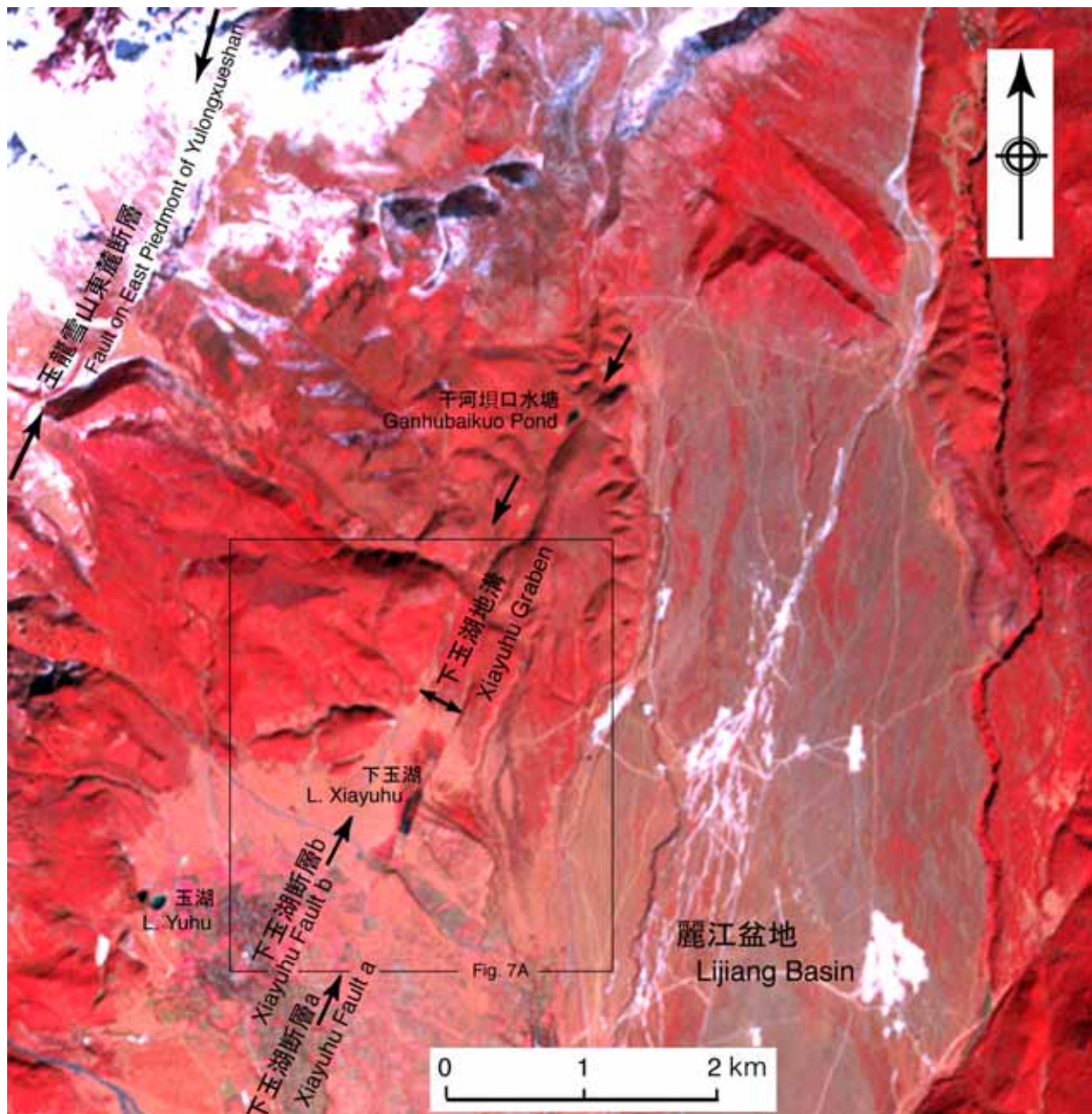


Fig. 6 ASTER image showing geomorphic structure around the northern margin of the Lijiang Basin. From ortho data Level-3A01 produced by ASTER GDS <<http://www.science.aster.ersdac.or.jp/index.html>>.

および、周ほか（1997）の「山前断裂西支断裂」の一部に相当する。断層跡は、大具から玉龍雪山東麓を南北方向に50kmにわたってのび（雲南省地質局、1977）、南端部は南南西方向へ湾曲する。断層崖は新鮮で、比高は1,500mに達する（任ほか、1957：Fig. 5A）。

玉龍雪山東麓断層は、地質断層 F_{14} （雲南省地質局、1977）が再活動したものである。 F_{14} は、断層面が東へ $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 傾斜する正断層で、下盤の上部デボン系～下部二疊系炭酸塩岩と上盤の上部二疊系玄武岩類～中部三疊系石灰岩を境する（Fig. 5B）。活断層

としての変位は、大理氷期（後期更新世）のモレーン堆積物の正断層変位によって確認され、鉛直落差は70m以上に達する（雲南省地質局、1977：Fig. 5C）。ちなみに、周ほか（1997）は、1996年麗江地震の震源位置・宏観的震央・地質構造などを総合して、この地震の起震断層が玉龍雪山東麓断層であるとした。

(2) (3) 下玉湖断層 a [確実度Ⅰ] および下玉湖断層 b [確実度Ⅲ]

麗江盆地と北方の干海子とは、基盤隆起部とモレーン群によって隔てられている（Fig. 4）。この基盤隆

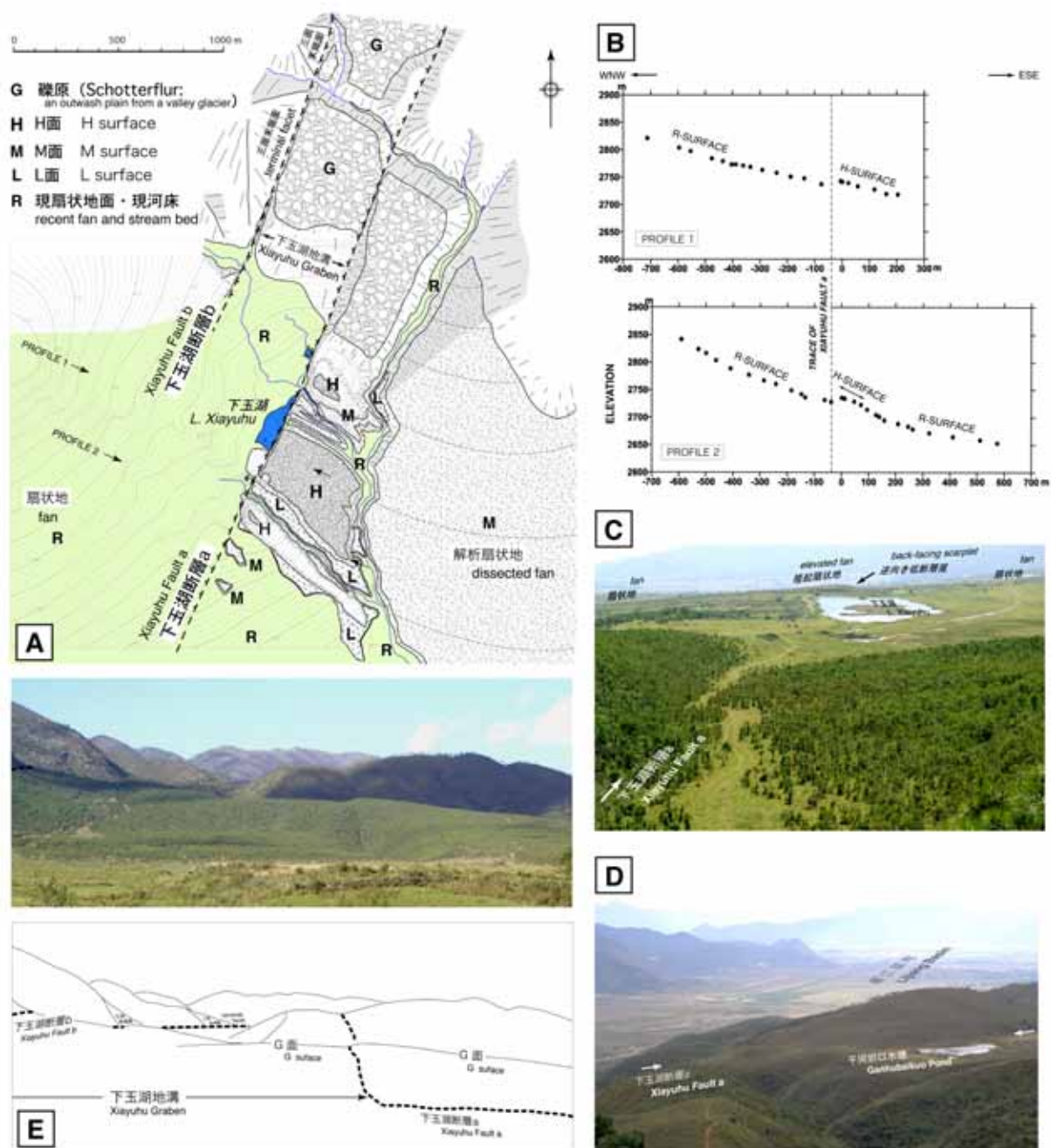


Fig. 7 Xiayuhu Faults. A: Geomorphologic structure around the Lake Xiayuhu at the northwestern corner of the Lijiang Basin. See Fig. 6 for location. B: Geomorphic profiles traversing the Xiayuhu Fault a, through differential GPS with AshtechProMark2. See Fig. 7A for location. C: Back-facing scarplet and fan displacement along the trace of the Xiayuhu Fault a, a view from the north. D: Back-facing scarplet along the northern trace of the Xiayuhu Fault a at the Ganhubaikuao Pond. See Fig. 6 for the location of the pond. E: Xiayuhu Graben, a northward view from the northern end of the Lijiang Basin.

起部には、玉龍雪山東麓断層に平行して、北北東-南南西方向の2条のリニアメントが認められる (Fig. 6)。これらのリニアメントは、筆者らの調査によって活断層と認定され、東側のものを下玉湖断層 a、西側のものを下玉湖断層 b とよぶ。

下玉湖活断層 a 全長 8km の断層で、その南部は麗江盆地内部へ達する (Fig. 6)。そこには、麗江盆地北西隅を扇頂とする扇状地が発達し、下玉湖とよばれる沼沢の東側で隆起扇状地化する (Fig. 7A)。詳細にみると、隆起扇状地は3段の段丘群で構成されている。それらは、現扇状地面との比高にもとづいて、高位の

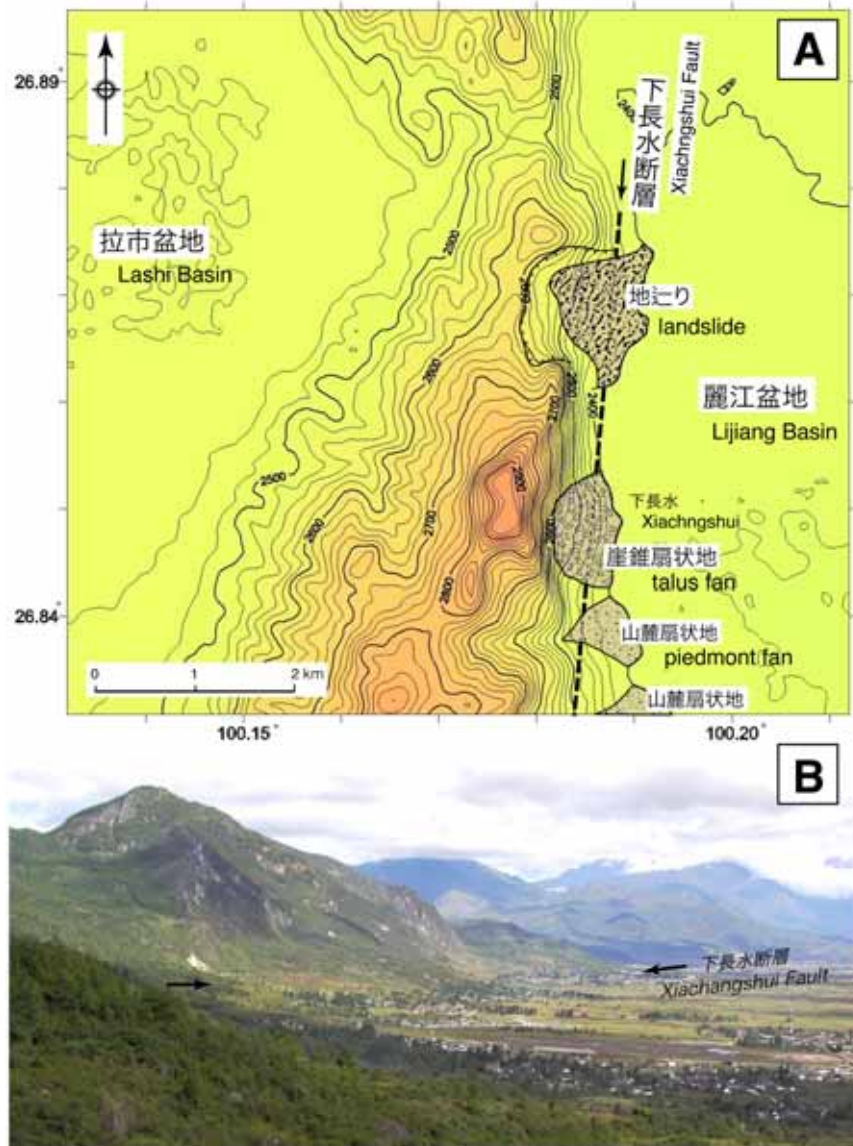


Fig. 8 Xiachangshui Fault. A: Geomorphic structure of the west margin of the southern Lijiang Basin. Imaging the SRTM 3" mesh data of NASA <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. B: Fault-scarp of the Xiachangshui Fault (a northwesterly view from the southern margin of the Lijiang Basin).

ものから H 面, M 面および L 面に区分され, 高位のものほど段丘面 (隆起扇状地面) の勾配が大きい。各段丘面の upstream 端は急傾斜した低崖になっていて (Fig. 7B), 低崖の高さは高位の段丘面ほど大きい。これらの低崖は, いずれも $N20^{\circ} E$ 方向に直線状に配列し, 衛星画像にみられる東側リニアメントの南南西延長にあたる。これらの事実は, Fig. 6 にみられる東側のリニアメントが, 東側ブロックを相対的に隆起させる累積変位をもたらした活断層であり, upstream へ急傾斜する低崖は逆向き低断層崖であることを示す (Fig. 7C)。

下玉湖活断層 a は, さらに, 扇状地北方に分布す

る G 面, すなわち段丘化した礫原 (Schotterflur: 谷氷河のアウトウォッシュプレーンとして形成された扇状地) を変位させ, 西側ブロックを相対的に沈下させている (Fig. 7A)。さらに北方の基盤岩地帯へも, 西側が相対的に沈下する変位地形が連続し, 東傾斜の山地斜面に逆向き断層崖が形成されている。麗江盆地の北縁をなす基盤隆起の北部には, 断層崖下に干河堤口水塘が形成されている (Fig. 7D)。

下玉湖断層 b 全長約 5km の断層で, 下玉湖活断層にはほぼ平行するが, 麗江盆地内への連続は確認できない。下玉湖断層 b を境に, いずれにおいても東側が地形的低所になっていて, 西側斜面には三角末

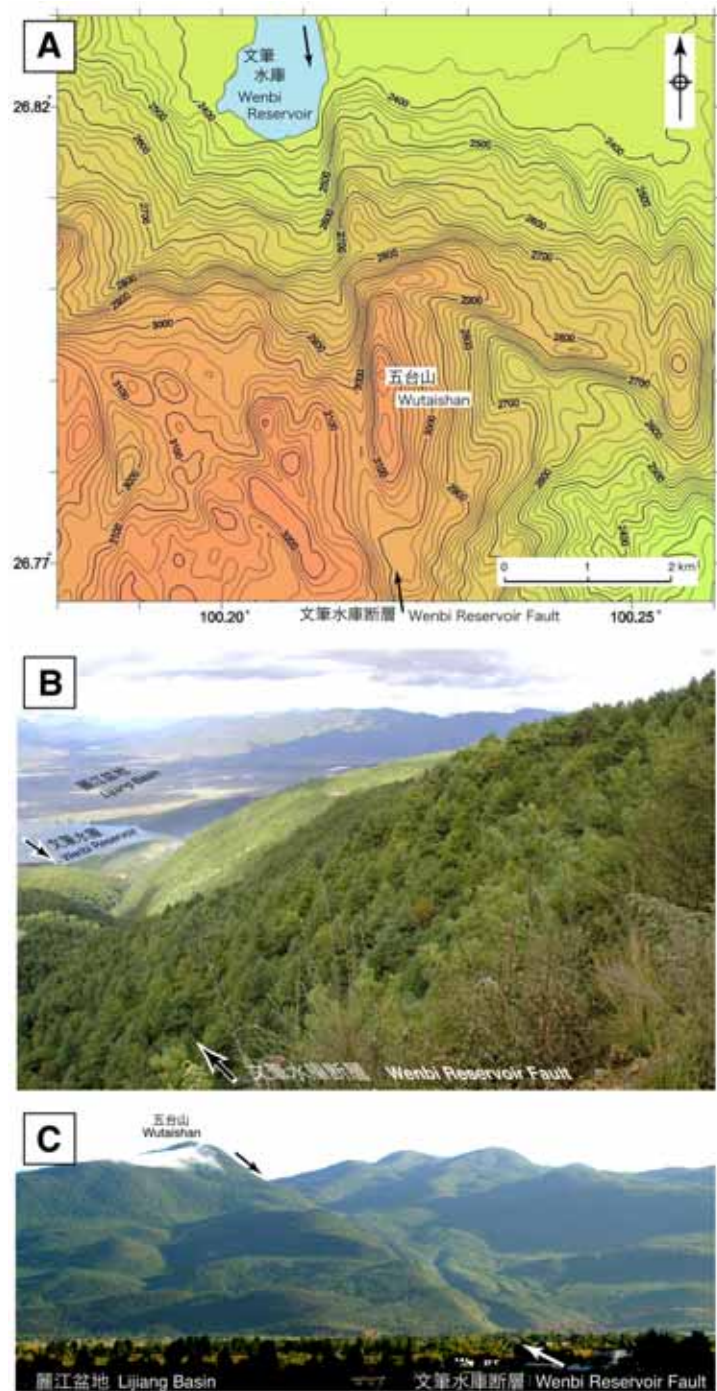


Fig. 9 Wenbi Reservoir Fault. A: Geomorphic structure of the marginal slope of the southwestern Lijiang Basin. Imaging the SRTM 3" mesh data of NASA <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. B: Scarp surface of the Wenbi Fault (a northward view from a pass west of Wutaishan). C: Fault-scarp of the Wenbi Fault (a southward view from the Lijiang Basin).

端面がみられる (Fig. 7A)。下玉湖活断層 a および b を全体としてみると、それらの間の狭長なブロック (幅 200~400m) が相対的に沈下した地溝状の構造をつくっている (Fig. 7E)。この小規模な地溝構造を、下玉湖地溝とよぶ。

(4) 下長水断層 [確実度Ⅲ]

麗江盆地南部の西縁は、南-北方向にのびる直線的な急崖となっていて (Fig. 8A)、明瞭なリニアメントをつくる。盆地西縁の山地は、中部三疊系石灰岩の岩峰 (海拔 3,065m) をいただく西緩東急の非対称山稜を形成し。とくに下長水付近では、岩峰の東斜



Fig. 10 Linear scarp continuous along the Gantangzi Fracture in the northeast part of the Lijiang-Jianchuan Fracture Zone (a southwesterly view from Wenhua).

面が比高 600m の急崖をなす (Fig. 8B)。急崖の麓には、巨大な崩落石灰岩塊が累積した崖錐扇状地 (talus cone) が発達し、斜面勾配は $17^{\circ} \sim 20^{\circ}$ に達する。さらに、この崖錐斜面の中腹に南北方向にのびる小地溝 (幅約 20m, 深さ 10~15m) が連続し、変動地形であることが示唆される。

(5) 文筆水庫断層 [確実度Ⅲ]

文筆水庫断層は、麗江盆地南西隅の文筆水庫から南へ向かって直線的にのびる鮮明なリニアメントで (Fig. 9A), Allen et al. (1984) によって活断層と認定された。三疊紀石灰岩からなる麗江盆地の南縁斜面に、比高 100~150m, 水平隔離 800~900m の急崖が連続し、急崖斜面はきわめて平滑で、鮮明である (Figs. 9B and 9C)。文筆水庫断層は、地質断層 F_{31} (雲南省地質局, 1977) と位置および変位センスともに一致する。

3.2 北東-南西断裂系

麗江盆地および周辺域に発達する北東-南西方向の断裂系のうち、もっとも顕著なものは、麗江盆地南部を斜断する麗江-劍川断裂帯 (国家地震局地質研究所・雲南省地震局, 1990) である (Figs. 3 and 4)。この断裂系は文化から、麗江、文筆水庫および南溪を経て、さらに南西方の劍川 (Fig. 1) まで連続し、多くの平行断層によって構成される。麗江-劍川断裂帯は明瞭なリニアメントをつくり、とくに、北東部の文化~麗江では連続的急崖を形成する (Fig. 10)。

麗江-劍川断裂帯は 2 条の平行断層—地質断層 F_{24} および F_{23} (雲南省地質局, 1977) —に代表され、麗

江よりも北東側では、干塘子および文化断層がそれらにあたる (国家地震局地質研究所・雲南省地震局, 1990)。両断層のうち、活断層と認定される部分をそれぞれ干塘子断層および文化断層とよぶことにする (Fig. 4)。

(6) 干塘子断層 [確実度ⅠまたはⅡ]

周ほか (1997) は、麗江に近い蓮花村~干塘子に、かつては系統の変位を示す左横ずれ尾根が存在していたことを報告した (Fig. 11)。干塘子断層のうち、このような活断層変位を示す部分を干塘子断層とよぶことにする。この変位地形は人為的改変によって消失し、今日では観察できない。このため、干塘子断層の活動度を、暫定的にⅠまたはⅡと評価した。周ほか (1997) には干塘子断層の変位量が記述されていないが、Fig. 11 に描かれた急崖の比高 (300~400m) と比較すると、この変位地形が示す左横ずれ変位量は 100m 以下であると推測される。



Fig. 11 Gantangzi Fault. Left-lateral offset spurs along the Gantangzi Fault at Lianhuacun (Zhou et al., 1997).

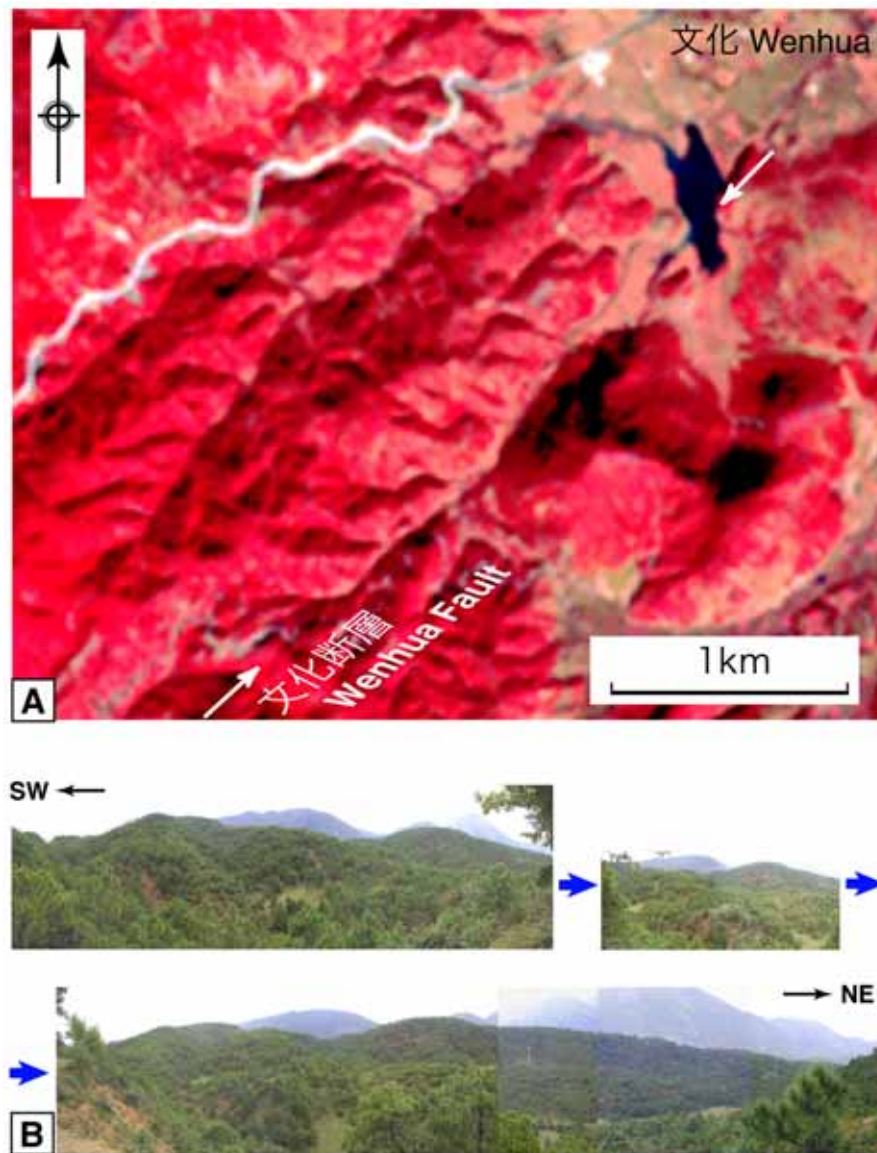


Fig. 12 Wenhua Fault. A: ASTER image showing the left-lateral displacement of the Wenhua Fault to the southwest of Wenhua. From ortho data Level-3A01 produced by ASTER GDS <<http://www.science.aster.ersdac.or.jp/index.html>>. B: Systematic left-lateral bend of spurs and streams on the northwest wall of the Wenhua Fault.

(7) 文化断層 [确实度Ⅱ]

干塘子断裂の南東側を並走する文化断裂のうち、断層変位地形が認められるのは、文化南東方の約2kmの区間である (Fig. 4)。衛星画像上では、断層線の北西側で6～7条の谷と尾根の系統的屈曲が認められ、左横ずれ変位を示す (Fig. 12A)。現地調査においても、左横ずれ屈曲が確認された (Fig. 12B)。画像解像度の限界や地形測量がおこなわれていないために、現在のところ、确实度はⅡに区分した。詳細な左横ずれ変位量は不明であるが、衛星画像からは最大200～300mであると推測される。

ちなみに麗江-劍川断裂帯全体としての水平変位

量について、雲南省地質局 (1977) は、麗江盆地南部のS字状湾曲 (Figs. 3 and 4) が麗江-劍川断裂帯の左横ずれ変位の結果であるとして、7kmと見積もった。いっぽう国家地震局地質研究所・雲南省地震局 (1990) は、このような大きな変位を示す確かな証拠はみいだされない、との見解を示した。議論の決着には、確実な変位基準の発見が待たれる。

3.3 北西-南東断裂系

北西-南東方向の断裂系のなかでは、麗江盆地と鶴慶盆地を隔てる玉龍関に活断層の存在が知られている。



Fig. 13 Scarp of the Yulongguan Fault bounding the Lijiang (right) and Heqing (left) Basins.

(8) 玉龍関断層 [確実度Ⅱ]

玉龍関をつくる基盤隆起の南縁は、北西-南東方向の断崖（比高 220m）になっていて、三疊紀石灰岩が露出する（Fig. 13）。この直線的な断崖は、麗江および鶴慶盆地の鮮新統三営層および下部更新統蛇山層の分布高度を変化させていることから、活断層であると推論されていて（任ほか，1957；雲南省地質局，1977），ここでは玉龍関断層とよぶことにする。雲南省地質局（1977）の地質断層 F_{14} に相当するが、活断層としての変位基準となりうる地形面や線構造の変位が確認されているわけではないので、確実度はⅡに区分される。

4. 麗江盆地の形成メカニズム

上述した麗江盆地および周辺域の地形-地質特性と活断層，ならびに，雲南省北西部の広域的地形-地質構造にもとづいて，以下では麗江盆地の形成メカニズムを考察する。

4.1 麗江盆地および周辺域の地形-地質構造からみた盆地形成メカニズム

前述のとおり麗江盆地の山麓線（平地と斜面の境界をなす傾斜変換線）は直線的で，リニアメントとして識別されるものも少なくない（Fig. 4）。南-北，北東-南西あるいは北西-南東方向の線分の組み合わせからなる山麓線は，麗江盆地が構造盆地であることを示し，浸食凹地を埋積した小盆地（龍山，文化，九子海など）の複雑に湾曲した山麓線とは著しく対

照的である。

麗江盆地および周辺域で認定された 8 条の活断層のうち，南北方向のものには縦ずれ変位が，北東-南西方向のものには左横ずれ変位がそれぞれ卓越する（Fig. 4）。これら 2 系統の活断層の共存は， σ_3 がほぼ東-西方向， σ_2 と σ_1 がそれぞれ南-北もしくは鉛直方向という応力場を示唆する。すなわち， σ_1 が鉛直， σ_2 が南-北の場合には縦ずれ変位が，逆に σ_1 が南-北， σ_2 が鉛直方向の場合には横ずれ変位が，それぞれ発生する。いいかえると， σ_1 と σ_2 の絶対値が比較的近似していて，相互にいかわりうる状態にあり，東-西方向の σ_3 の絶対値が σ_1 や σ_2 のそれよりも有意に小さいことが，麗江盆地および周辺域における応力場の基本的特徴になっている。数式化すると， $\sigma_3 = E-W$ ， $\sigma_2 / \sigma_1 = N-S / \text{鉛直}$ ， $[\sigma_3] < [\sigma_2] \sim [\sigma_1]$ となる。

このような造構場における麗江盆地の形成メカニズムは，Fig. 14 に模式的に示される。このモデルは， σ_1 が鉛直方向にある時相には地溝が発生・成長し， σ_1 が水平方向にある時相には横ずれ変位が進行する，というものである。これら 2 つの時相が交互にくりかえされることによって，麗江盆地および周辺域の地質構造（Fig. 4）が形成されたと考えられる。

4.2 大理-麗江地区および周辺の地形-地質構造からみた麗江盆地の形成メカニズム

雲南省北西部のなかで大理-麗江地区には，麗江盆地をはじめ多くの山間盆地が集中的に分布し

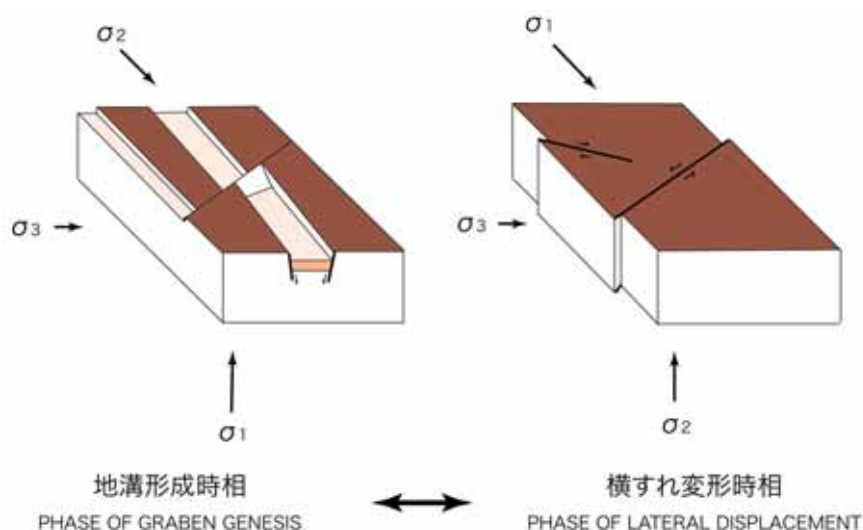


Fig. 14 Structural model showing graben genesis and lateral displacement in a stress state $[\sigma_3] < [\sigma_2] \sim [\sigma_1]$.

(Fig. 1), 一定方向に並ぶ傾向があるために“串珠盆地” (国家地震局地質研究所・雲南省地震局, 1990) ともよばれる。これらの山間盆地群の形成メカニズムについては、右横ずれプリアパート (Tapponier and Molnar, 1977; Armijo and Tapponnier, 1989), 左横ずれ優勢プリアパート (Ma and Wu, 1987), 共役断層運動にともなう地溝陥没 (国家地震局地質研究所・雲南省地震局, 1990), 右横ずれ断層にともなう bookshelf faulting (Leloup et al., 1995), 右横ずれ断層の末端屈曲および分岐による地溝形成 (號ほか, 2001: Woodcock and Fischer, 1986 の leading extensional imbricate fan に類似) など, さまざまなモデルが提案されている。これらのモデルは, いずれも, 横ずれ変形場を想定するという点で共通している。

筆者らは, 麗江盆地の形成メカニズムを考察するために, 広域的地形-地質構造解析 (広域的地形-地質踏査, 衛星画像判読, DEM 画像判読, 文献資料収集, など) を行ない, その結果を大理-麗江地区および周辺域の活構造図にまとめた (Fig. 15)。全体としてみると, 大理-麗江地区の山間盆地群は, 北北西-南南東方向の右ずれ master faults (中甸および紅河-哀牢山断層系) の右 stepping に形成された巨大プリアパート盆地 (幅 100km, 長さ 75km) 中に発生した地溝群であると考えられ, 広域応力場としては, 北北西-南南東方向の σ_1 および東北東-西南西方向の σ_3 が想定される。この巨大プリアパート盆地を, 滇西北プリアパート盆地 (「滇」は雲南省の略称) と呼ぶことにする。プリアパート盆地の長さを規定している oblique faults は, 南-北～北北東-南南西走向の劍川および程海断層系である。

滇西北プリアパート盆地内部における応力場は, さまざまな不均一性のために時空的にきわめて複雑であ

ることが予想される。Michel and Michel (1985) が紹介した Liu による数値シミュレーションにもとづくと, σ_3 は, 盆地内部へ向かつては, master fault に平行な方向へ回転する傾向を示す。詳細は別にしても, プリアパート盆地内ではほぼ東-西方向の引張場が支配的であると考えられ, 山間盆地の多くは, master faults や oblique faults に規制されつつも, 全体としては南-北方向に伸長した概形を示す (Figs. 1 and 15)。このような滇西北プリアパート盆地の形成過程で, 麗江盆地および周辺域では σ_1 と σ_2 が相互にいかかわることによって, 麗江盆地や鶴慶盆地をはじめとする南-北方向の地溝群と北東-南西および北西-南東方向の共役横ずれ断層系が形成された (Fig. 14)。このような応力場の転換の要因は不明であるが, 1 つの可能性として, 次のようなメカニズムが考えられる。すなわち, 滇西北プリアパート盆地内部への広域応力場の直達 (横ずれ変形時相) と, その結果生じる master faults の変位によるプリアパート盆地の伸長 (地溝形成時相) の反復に由来する, というものである。

ちなみに, 滇西北プリアパート盆地の南西側の master fault である紅河-哀牢山断層系には, 明瞭な右横ずれ変位地形が 300km にわたって連続することが知られ, 水平変位量は 5~6km (Allen et al., 1984), 10.5~30km (號ほか, 2001), 20~50km (Leloup et al., 1995) と見積られている。北東側の master fault は中甸断層系 (国家地震局地質研究所・雲南省地震局, 1990; Leloup et al., 1995) とよばれ, 断層跡は中甸, 大具を経て大東に達する。地質断層 $F_{34} \cdot F_{33}$ (雲南省地質局, 1977) としても存在が確認されているが, 活断層変位量の詳細については未解明である。

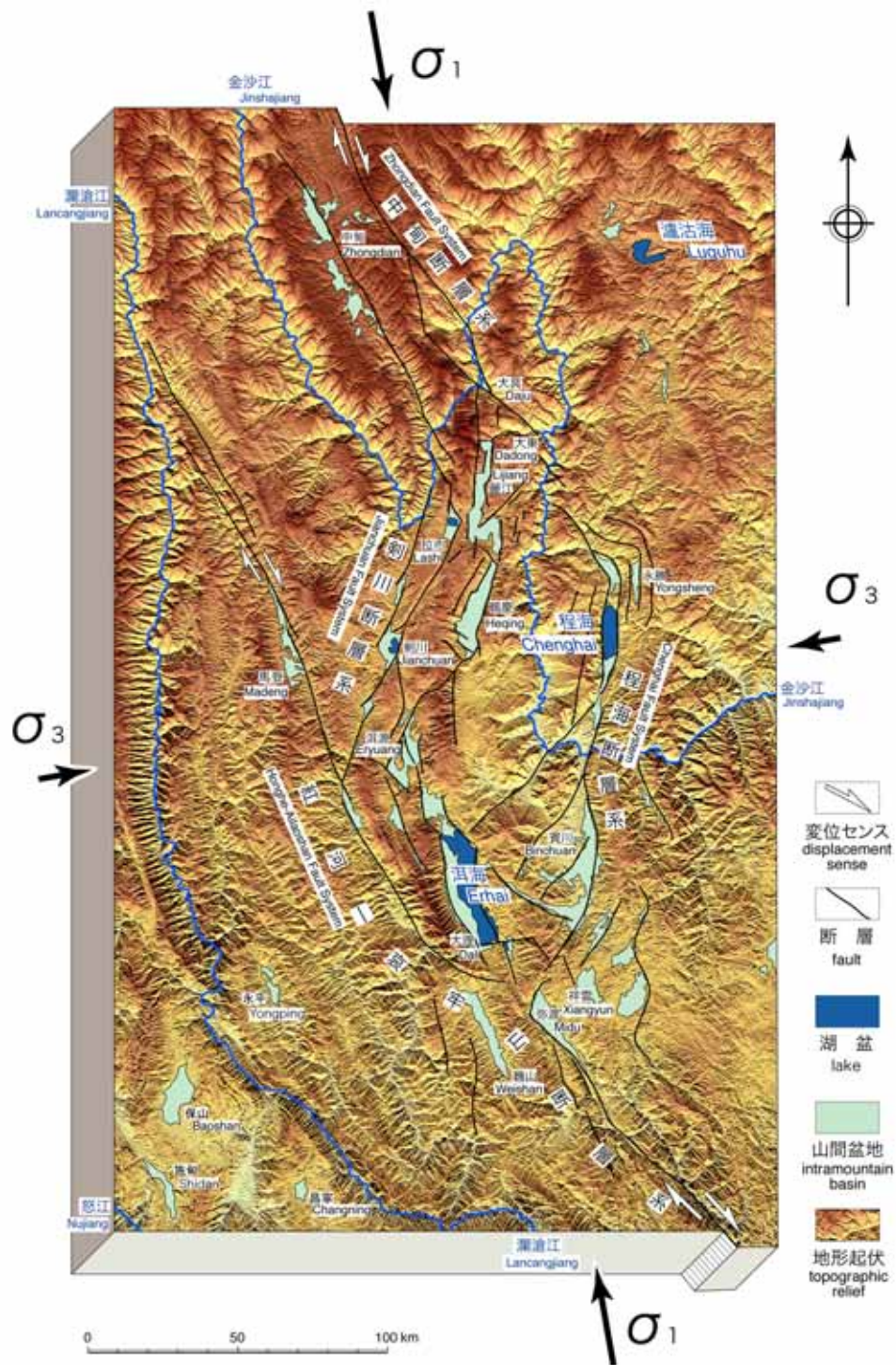


Fig. 15 Active structures in and around the Dali-Lijiang area, northwestern Yunnan. Topographic relief: imaging from the SRTM 3" mesh data of NASA <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>> through KASHMIR.

5. まとめと今後の課題

この論文では、麗江盆地および周辺域の地形-地質特性と活断層ならびに大理-麗江地区の広域活構造を記述し、それらにもとづいて麗江盆地の形成メカニズムについて考察した。おもな結論は、次のよう

にまとめられる。

① 麗江盆地および周辺域の地形は山岳・高原・山間盆地および河谷から構成される。地質は、シルル系～三疊系および始新統で構成され、これらの変形層を削剝する浸食小起伏面が海拔 3,000m 前後に隆起し（雲南平面）、山間盆地周辺には鮮新統三疊層お

よび下部更新統蛇山層が分布する。

② 麗江盆地は南-北方向に伸張した山間盆地で、南部は S 字状に湾曲する。盆地の周縁の斜面は、南-北、北東-南西および北西-南東方向の急崖～急斜面（比高：数 100～1,500m+）の組み合わせからなり、麗江盆地が構造盆地であることを示す（Fig. 3）。

③ 麗江盆地および周辺域には、南-北、北東-南西および北西-南東方向に延びる 8 条の活断層が認定される。南北方向の活断層には縦ずれ変位が、北東-南西方向の断層には左横ずれ変位が、それぞれ卓越する（Fig. 4）。

④ 共存するこれら 2 つの活断層系（N-S 走向=縦ずれ、NE-SW 走向=左横ずれ）が示す応力場は、 $\sigma_3 = E-W$, $\sigma_2 / \sigma_1 = N-S$ /鉛直, $[\sigma_3] < [\sigma_2] \sim [\sigma_1]$ である。地溝形成時相（ $\sigma_1 =$ 鉛直）と横ずれ変形時相（ $\sigma_1 = N-S$ ）の反復が、麗江盆地および周辺域の変動地形を形成した（Fig. 14）。

⑤ 雲南省北西部の大理-麗江地区に集中的に分布する山間盆地群は、北北西-南南東方向の右横ずれ master faults（中甸および紅河-哀牢山断層系）の右 stepping に形成された滇西北プリアパート盆地（幅 100km, 長さ 75km）中に発生した地溝群である。広域応力場としては、北北西-南南東方向の σ_1 および東北東-西南西方向の σ_3 が想定される（Fig. 15）。

⑥ 麗江盆地および周辺域における主応力方位の転換は、滇西北プリアパート盆地内部への広域応力場の直達（横ずれ変形時相）と、その結果生じる master faults の変位によるプリアパート盆地の長さ方向への伸長（地溝形成時相）に由来する可能性がある。

雲南省北西部における広域的右横ずれ変位は、一般に、インド-ユーラシア大陸衝突に起因するチベット高原の南東 extrusion に由来すると考えられている（Tapponier and Molnar, 1977; Tapponier et al., 2001）。南東 extrusion については、チベット高原南東部における地球表層部の重力滑動に由来するとの見解もあり（馬, 1989）、地殻下部～上部マントルには低速度層や高電気伝導層の存在も知られている（Tan, 1987; 国家地震局地質研究所・雲南省地震局, 1990; Huang et al., 2002）。麗江盆地を含む滇西北プリアパート盆地は、チベット高原～雲貴高原の傾動的隆起運動とほぼ同期して発生したものである（国家地震局地質研究所・雲南省地震局, 1990）。したがって、滇西北プリアパート盆地の発生位置や複雑な構造特性は、チベット高原の南東 extrusion にとまう水平運動のみならず、広域的な隆起運動や地殻下部～上部マントルの地域性にもかかわりをもっている可能性がある。

たとえば、Huang et al.（2002）の地震モトグ

ラフィによると、滇西北プリアパート盆地下の深度 25～40km に低速度層が存在し、そのひろがりや盆地の外形に調和的である。また、南-北方向に狭長な麗江盆地および鶴慶盆地の盆地面はともに南方へ緩傾斜し、北部では隆起扇状地や段丘地形が発達するが、中～南部には沖積低地がひろがり、チベット高原～雲貴高原の広域的傾動隆起運動に調和的である。同様な地形配置は、滇西北プリアパート盆地の山間盆地群にも共通し（国家地震局地質研究所・雲南省地震局, 1990; 呉, 1992）、山間盆地の内部構造にも、チベット高原東部～雲貴高原における広域的な傾動隆起運動が反映されていることを示唆する。いずれにしても、麗江盆地をはじめチベット高原南東域のネオテクトニクスの全容とその起源を理解するには、地球科学データのいっそうの蓄積とより統合的な機構解明が必要である。

謝 辞

この調査研究に対して、雲南省地震局、麗江県、ならびに麗江県地震局の諸氏には貴重なご助言・ご議論をいただいた。雲南省～四川省南南西部における広域的地形-地質調査は、孫 枢・（故）从柏林・呉 根耀の諸氏をはじめとする中国科学院地質与地球物理研究所の三江褶曲帯研究グループとの共同研究によって実施されたものである。衛星画像解析については、[独立行政法人]石油天然ガス・金属鉱物資源機構の大岡 隆氏からご教示をいただいた。調査・研究をすすめるにあたり多大なご援助をいただいた以上の方々に、厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 赤松純平[編著]マイクロゾーニングを目的とした中国雲南省麗江盆地の共役断層と基盤構造の調査研究, 平成 14～16 年度科学研究費補助金(基盤研究 B(1))研究成果報告書(No. 14404020), (印刷中)。
- 雲南省地質鉱産局 (1990) 雲南省区域地質誌。中国人民共和国地質鉱産部地質報, 一 区域地質, no. 21, 728p., 地質出版社, 北京。
- 雲南省地質局 (1977) 区域地質調査報告 (麗江幅), 1: 20 万。
- 雲南省地質局・滇西地震予報実験場 (1998) 一九九六年麗江地震, 雲南省地震局・滇西地震予報実験場, 192p., 地震出版社, 北京。
- 號順民・計風桔・向宏發・董興權・産富華・張双林・李新元・張晚霞 (2001) 紅河活動断裂帶, 172p.,

- 海洋出版社, 北京.
- 活断層研究会編 (1980) 日本の活断層—分布図と資料—. 東京大学出版会, 365p., 東京.
- 活断層研究会編 (1991) [新編] 日本の活断層—分布図と資料—. 東京大学出版会, 437p., 東京.
- 吳根耀 (1992) 滇西北麗江-大理地区第四紀断裂活動的方式, 機制及对环境的影响. 第四紀研究, 第3期, 265-276.
- 国家地震局地質研究所・雲南省地震局 (1990) 滇西北地区活動断裂. 地震出版社, 321p., 北京.
- 駒澤正夫・中村佳重郎・赤松純平・蒋 樂群・李 康龍・西村敬一・盛川 仁・矢野孝雄・坂井公俊・宇田 川鎮生・楊 東生 (印刷中) 中国雲南省麗江盆地及び鶴慶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—. マイクロゾーンニングを目的とした中国雲南省麗江盆地の共役断層と基盤構造の調査研究, 平成 14~16 年度科学研究費補助金(基盤研究 B(1))研究成果報告書(代表者: 赤松純平、No. 14404020), (印刷中).
- 周全光・張建国・周瑞琦・吳伯黔・王桂蘭 (1997) 麗江 7.0 級地震の地震地質構造背景分析. 地震研究, 20, 92-100.
- 杉本智彦 (<http://www.kashmir3d.com/>): KASHMIR 3D for 3DCG Maps & GPS.
- 馬杏垣主編 (1989) 重力作用与構造運動. 地震出版社, 北京.
- 劉祖蔭・蘇有錦・秦嘉政・李忠華・張俊佛 [編著] (2002) 20 世紀雲南地震活動. 288 p., 地震出版社, 北京.
- 任美鏐・劉振中・雍萬里・包浩生・緯同春 (1957) 麗江和玉龍山地貌的初步研究. 雲南大学学报, 9-18.
- Akamatsu, J. [ed.] (1997) Lijiang Earthquake in Yunnan, China, of February 3, 1996 –Reconnaissance Report. 174 p., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.
- Allen, C.R., Gillespie, A.R., Han, Y., Sieh, K.E., Zhang, B. and Zhu, C. (1984) Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard. Geol. Soc. Am. Bull, 95, 686-700.
- Armijo, R. and Tapponier, P. (1989) Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet. Jour. Geophys. Res., 94, 2787-2838.
- ASTER GDS: Ground Data System for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer <http://www.gds.aster.ersdac.or.jp/gds_www2002/exhibition_j/a_project_j/set_a_project_j.html>
- Huang, J., Zhao, D. and Zeng, S. (2002) Lithospheric structure and its relationship to seismic and volcanic activity in southwest China. Jour. Geophys. Res. 107, 10.1029/2000JB000137.
- Kusuda, T. and Nakamura, M. (1997) Seismotectonics and seismic activity in northwestern part of Yunnan Province. In: Akamatsu, J. (ed.), Lijiang Earthquake in Yunnan, China, of February 3, 1996, Reconnaissance Report, 61-67, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University.
- Leloup, P.H., Lacassin, R., Tapponnier, P., Scharer, U., Zhong, D., Liu, X., Zhang, L., Ji S. and Phan, T.T. (1995) The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. Tectonophysics, 251, 3-84.
- Ma, X. and Wu D. (1987) Cenozoic extensional tectonics in China. Tectonophysics, 133, 243-255.
- NASA: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM-DEM) <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>.
- Tan, T. [Chen Z.] (1987) Geodynamics and tectonic evolution of the Panxi rift. Tectonophysics, 133, 287-304.
- Tapponnier, P. and Molnar, P. (1977) Active faulting and tectonics in China. Jour. Geophys. Res., 82, 2905-2930.
- Tapponnier, P., Xu, Z., Roger, F., Meyer, B., Arnaud, N., Wittlinger, G. and Yang, J. (2001) Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. Science, 294, 1671-1677.
- Woodcock, N.H. and Fischer, M. (1986) Strike-slip duplexes. Jour. Structural Geol., 8, 725-735.

Geomorphic-geologic structure and formative mechanism of the Lijiang Basin, Yunnan Province, China

YANO Takao¹⁾, AKAMATSU Junpei, LI Kanglong²⁾, NISHIMURA Keiichi³⁾,
JIANG Lequn⁴⁾, KOMAZAWA Masao⁵⁾, NAKAMURA Kajuro, MORIKAWA Hitoshi⁶⁾,
SAKAI Kimitoshi⁶⁾, and UDAGAWA Shizuo⁶⁾

¹⁾ Faculty of Regional Sciences, Tottori University

²⁾ Seismological Bureau of Lijiang Prefecture

³⁾ Faculty of Informatics, Okayama University of Science

⁴⁾ Earthquake Administration of Yunnan Province

⁵⁾ Geological Survey of Japan, AIST

⁶⁾ Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Synopsis

Many intramountain basins are concentrative in the Dali-Lijiang area, northwestern Yunnan. Formative process of the Lijiang Basin northernmost in the area is investigated on the basis of basin features and active faults and of regional active structure. Among eight active faults in and around the Lijiang Basin, those in N-S trend are of dip- and those in NE-SW are of left lateral-slip. Their coexistence indicates that, the direction of σ_3 is E-W, that of σ_2 N-S or vertical, and that of σ_1 vertical or N-S, with $[\sigma_3] < [\sigma_1] \sim [\sigma_2]$. Repeated exchanges of σ_1 and σ_2 have produced the tectonic landform in and around the Lijiang Basin, characterized with grabens and lateral displacements. Regional active structure indicates that the intramountain basins concentrative in the Dali-Lijiang area are a group of grabens formed in a large pull-apart basin (100 km wide and 75 km long) at the right stepping of two master faults in NNW-SSE trend. The regional stress field for the genesis of the pull-apart basin appears to be of the σ_1 of NNW-SSE trend and the σ_3 of ENE-WSW. The exchanging mechanism of principal stress directions in and around the Lijiang Basin could be the repetition between the penetration of regional stress field into the pull-apart basin and the consequent extension of the pull-apart basin due to master fault displacement.

Keywords: Yunnan Province, Lijiang Basin, active fault, stress field, pull-apart basin.