

モンゴルに地震断層を追う

Tracing an Earthquake Fault in Mongolia

大矢 暁¹⁾

1. ブルネイ地震断層と活断層会議

1905年7月モンゴル北西部で2回の巨大地震が発生した。地震の規模は以下に示すとおりであり、延長の長い地震断層が形成されたことが特徴的である。付けられた地震の名前は幾つかあるようであるが、現在ではTsetserleg地震, Bulnay地震と呼ばれている。

- 7月9日 ツェツェルレグ (Tsetserleg) 地震
マグニチュードMw: 8.1 延長120kmの地震断層が出現
- 7月23日 ブルネイ (Bulnay) 地震
マグニチュードMw: 8.3 延長370kmの地震断層が出現

これらは大陸内部に起こった地震としては最大規模のものである。とくにブルネイ地震に伴う地震断層は、東の端はホヴスゴル (Hovsgol) 県 (Aimag) の Sanglin Dalai湖, 西はKhan-Khukhii山脈のKhangiltsag川の水源域に及ぶ370kmに亘って追跡調査された (文献2)。

ブルネイ地震断層で出来た左横ずれ断層は、最大移動量11m, 垂直変位量は殆どない。地震発生直後には、深さ60m, 幅10mの割れ目が出来たことが記録されている (文献2)。100年経った今でも、左横ずれ断層の典型的な断層地形を延々と追いかけることができる。100年前の断層地形が今でも観察できるのは、断層による変状規模が大きかったこと、雨量の少ない乾燥気候や永久凍土の存在などで侵食による地形変化が少ないこと、人口密度が極めて低く、昔ながらの遊牧以外人口の手が加えられていない環境にあることなどによる。

この断層の研究を続けて来たモンゴル科学技術大学地質学科のバヤス (Bayasgalan Amgalan) 教授は、過去数年活断層の共同研究を進めてきた東京工業大

学の衣笠善博教授と語り、この地震の100周年を記念して、まさに震源地の近くの活断層の真上で、地震の起こった7月23日に、国際現地活断層会議を開催する計画を立てた。

会議の正式名称は“Centennial of Great Tsetserleg and Bulnay M>8 Earthquakes - Scientific field conference on earthquake fault ruptures in Mongolian beautiful nature July 22-29, 2005 -”で、主催はモンゴル科学技術大学ならびに東京工業大学、後援団体はモンゴル鉱産資源庁並びにモンゴル科学アカデミー宇宙地球物理学研究センターである。

2. 現地はウランバートルの西800kmのハンガイ高地の北部にある

1905年に起こった地震と地震断層の位置を第1図に示した。モンゴルの中西部にあるハンガイ (Hangay) ドームと呼ばれる高地の北部、ロシアとの国境に近いところである。

ウランバートルから国内便でモロン (Moron) という地方都市に飛び、それから自動車で現地に行くという計画である。第1図にも示したようにモンゴルは国の平均標高が1,580m, 現地の標高は約2,000mの高原地帯である。地震の起こった7月は気候の厳しいモンゴルを訪れるには最高の季節である。

7月22日夕刻ウランバートルを発ったエアロモンゴリア便は、世界各国から集まった活断層の研究者総勢40名他を乗せて、午後9時モンゴル北西部のモロン空港に着いた。モロン空港はハヴスヴォル (Havsvol) 湖国立公園周辺の観光地の玄関口として知られる。

空港に出迎えにきてくれた輸送部隊はロシア製のジープ、ロシア製ジープ改良バス、そしてフォードSV

キーワード: 活断層, 地震断層, ネオテクトニクス, 大陸内地震, モンゴル

1) 応用地質株式会社 相談役
NPO地質情報整備・活用機構 会長



第1図 モンゴル全体を示す衛星画像地図。東西に伸びる黒線がブルネイ断層。○はツェツェルレグ地震(断層中央部上)、ブルネイ地震(断層左側)の震央。三角は現地会議のキャンプ地No.1、(右側)No.2(左側)を示す。

など合計6台。いずれも4WD車である。

会議を行う現地は大草原のど真ん中で、町からは車で数時間以上走らなければならない僻地。ホテルどころか家屋も無い自然そのもの。参加者は自分のテント・寝袋を持ち込むことが参加条件になっている。モロン市内の食堂で最後の人里での夕食をとり、直線距離で約200km離れたブルネイに向かう。地図を見るとモンゴルの国道とも言える道路が書かれているのだが、実際にモロンの街を出ると、我々には道無き道を走っている感覚であった。舗装は全くない。標識も無い。それでも峠に建てられているモンゴル風道祖神が街道であることを示している。この道祖神の周りを右回りに3回廻り拝礼して旅の安全を祈るのだそうだ(写真1)。

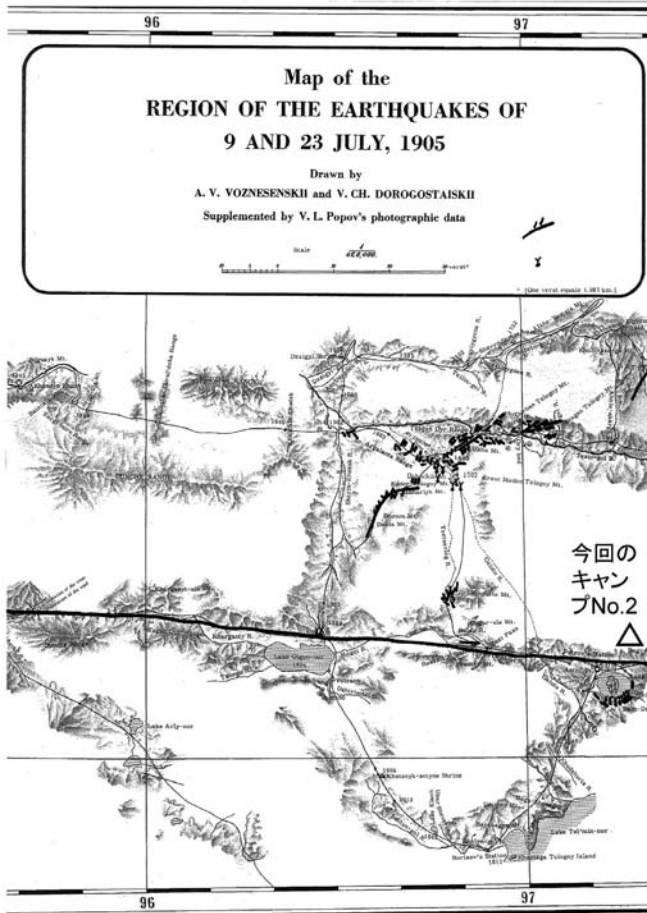
夏時間を取っていることもあり、モンゴルの夜は明るい。それでも、10時半を過ぎると暗くなる。また7月はこの地域の雨季ということで小雨も降ってくる。満月が雨雲に隠され真っ暗になる中を、車はひたすらバンピーロードを走る。しっかり何かをつかんでいないと車の天井にいやと言うほど頭をぶつける。居眠りをするような余裕は全くない。時速は50km/hも出ていないのに酷い揺れである。悪路を走ること5時間。どうやら目的地に近づいたようではあるが道を間

違った様子。運転手が何人か集まり相談している。「もうこの辺でテントを張りたい」などの声が出てくる中、再度出発して1時間後、ようやく目的地キャンプNo.1地点に着いたのは明け方近い3時半であった。

寒い。酷く寒い。早速、真っ暗闇の中で各自テントを張り、シュラフに潜り込む。それでも寒い。この日はとくに冷え込んで、霜が下りるほどの気温であったから5-6℃に下がったのではないかと思える。夏山



写真1 道なき道に見えるが峠には国道のマークといえる石積みがある。旅の安全を祈念する。日本では道祖神である。



第2図

100年前ブルネイ地震直後に地震断層全延長にわたって詳細なマッピングを実施したロシアの地質学者、Voznesenskiの作成したルートマップの部分図。東西に走る断層がブルネイ断層。右上部に細かい断層群が見られるのはツェツェルレグ地震で出来たラプチャー。キャンプNo.2を足場にこの図の範囲はわれわれも歩くことが出来た。

震は4日間続き、地鳴りを伴ったが、徐々に静穏化した。そして延長115kmのラプチャーが生じた。このラプチャー(地震断層)を調査したVoznesenskiによれば、垂直変位は大きくても1mと左横ずれに比べて小さなものであった。割れ目の幅は最初6mに達したのもあったが、時間を経て狭くなった。割れ目の深さは60-65mに達したのもあった。割れ目が出来るとき火花が散ったということである。多くの場所で、新しく出来た割れ目に沿って水が噴出した。などが報告されている。

Voznesenskiは、7月23日の地震はより規模の大きなもので、10時46分に起こったこと、強い余震は12月まで続いたことを記載し、本震に伴って延長350kmの地震断層が生じたことを踏査して確認している。このラプチャーは以後ブルネイ断層と呼ばれる。後に、ロシアの地質学者N.A. Marinov, V.A. Bobrovなどは、この断層延長は500kmに及ぶと報告しているが

(1958, 1959, 文献5, 6)、直後に現地調査をしたVoznesenskiの記載が正しいようである。Voznesenskiも記載しているが、この断層の西側延長部には昔活動したと思われる断層地形が続いているということであるので、活断層の延長としては500kmあったとしてもブルネイ地震で生じた地震断層は350-370km程度というのが正しいようである。

Voznesenskiは地震断層について以下のように述べている。

1. 直線的な断層で、断層沿いに多少の段差が生じている場合がある。
2. 断層が平行して小規模な、0.5-1.5m幅の陥没部を作る。
3. 10-12m幅の引っぱり割れ目がエシェロン状に出来、その間に2m以下の高まりを持つバルジがエシェロン状に並ぶ。
4. 垂直並びに水平変位を示す衝上断層的な部分

もある。

また、Vozenesenskiは地震について現地で詳しい聞き込み調査を行っている。現地の人たちの話では地震に先駆けて地鳴りが聞こえたこと、多くの人が地鳴りは西から東に動くように聞こえたということである。

また、Vozenesenskiの記載を詳細にチェックしたN.A. FlorensovとV.P. SolonenkoはVozenesenskiが断層の延長規模を詳しく実地調査し、断層の終点を注意深く確認していることを評価している一方、断層の変位、横ずれの方向や変位量について確かめていないことを批判し、記載された断層の状況から判断して、垂直変位をほとんど伴わない横ずれ断層であると結論している。

第2図はVozenesenskiが作成した断層のルートマップの一部である。おそらく、この時点では近代的な地形図は出来ていなかったのであろう。歩いたルートだけでなく、周辺の地形を描いており、当時としては大変な地震断層調査であったと評価できる。

4. フィールド地震会議は素晴らしい企画であった

会議は毎日3時間程度、大型テントの中でプレゼンテーションをし、質疑応答をし、その後断層沿いに現場を歩く。あるいは午前中に現場を歩き、午後から会議や発表をする。キャンプNo.1には3日滞在、50kmほどの範囲の断層トレースをし、トレンチを見、あても無い、こうでも無いと議論を重ねる。

とにかく、人工の手が加えられたものは何も無い大自然の中、電話もなし、インターネットもなし、バストイレもない。夜は10時半まで明るい。狭いテントに潜り込んでも仕方がない。だから、プレゼンテーションの時間が少々伸びても何も支障がない。幾らでも質問をぶつけ議論ができる。

巡検では左横ずれ断層の典型的な地形であるという、エシェロン(雁行配列)が延々と続くのを追いかけてながら歩く。断層の延長方向はほとんど東西で直線状に続くが、エシェロンは、北東-南西に延びた小高いバルジ(Bulge)と、バルジとバルジの間に出来た窪み(デプレッション)が断層方向と30°ほどの角度を持って「ミ」の字の配列に並ぶ地形である。

確かに100年前に出来た断層地形が残されている。

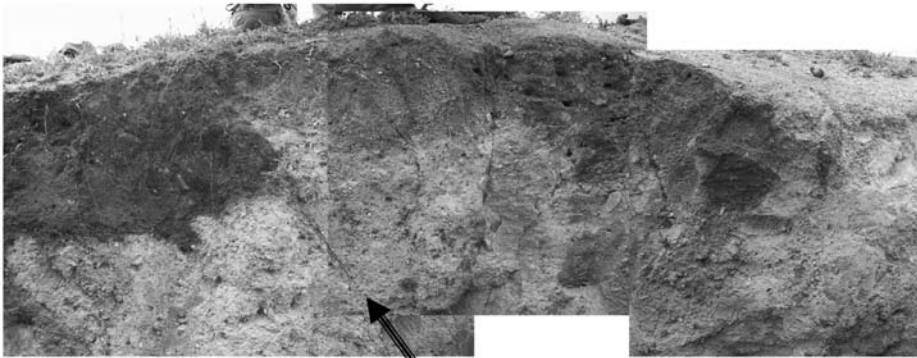


写真3 プルネイ地震直後に現地断層調査に赴いたロシアのVozenesenskiが撮影したエシェロン割れ目(Florensov and Solonenko, 1953, 文献2)。画面下部に左右に伸びるクレバス状のシャープな割れ目の壁が見て取れる。その後ろ、馬の左側には表層土壌が圧縮され隆起したバルジが見て取れる。現在見られる地形に比べるとまことに荒々しい。

それでも地震直後に出来たものは、もっと荒々しかったのではないかと想像される。100年の風雪、とくに冬はマイナス40度にもなる酷寒の気候であるから、毎年凍結融解を繰り返す中で、荒々しく隆起したバルジは角が取れ、高山植物で覆われたやさしいふくらみのバルジに変わっていったに違いない。また、深い引っぱりクラックといえるエシェロン状の割れ目はバルジからの崩落土で埋まり、なだらかな窪み、デプレッションに変化していったと考えられる。

断層を見ながら地震直後にはどんな形をしていたのだろうか、いろいろな議論が出たが、「ほとんど雨も降らない国だから、地形はあまり変わっていないのではないか」という意見から、「凍結融解の繰り返しでかなり変わったに違いない」などさまざまな見解が出たのだが、もし地震直後に撮影された写真があれば、一発で答えが出る問題である。

帰国してから調べたのであるが、その写真がSolonenkoの著書にあった。Vozenesenskiが撮影した地震直後のエシェロンの写真が掲載されていたのである。写真はあまり鮮明ではないが、写真3に引用した、クレバスといっても良いような鮮烈な深みのある割れ目が写真から見て取れる。現在見られるデプレッション地形とはまったく違う。明瞭なクレバス状の割れ目が形成されているのが見られる。現在のデプレッションはクレバス状の深みのあるクラックが周りか



古い腐植表土を切っている明瞭な逆断層

写真4

トレンチの壁面露頭中央部の土塊が左右からの圧縮でスラストアップしているのが見られる。

らの崩落土砂で埋められたものであることが結論できる貴重な写真である。クラックのエシェロンから窪みのエシェロンへと変わっていったことが明らかにされた写真である。

巡検の対象にはトレンチも準備されていた。以前に調査したトレンチを掘りなおして準備してくれていた。トレンチの断面には無数の逆断層や褶曲したような変状が見られる。

トレンチのスケッチを皆一生懸命にしているのが印象的であったが、このトレンチはバルジの部分に掘られたトレンチであり、そこに見られる断層は、横ずれ断層そのものではないことが明らかであった。それでも、断層を追いかけて詳しいスケッチをしながら議論が尽きない。衣笠さんは、10mもの横ずれがあったことを考えて見ないといけない、トレンチの限られた断面に拘ると末梢的な現象だけを見てしまう、もっと大きな見方をしないといけない、とスケッチには熱心でなかったのが印象的であった。私もその通りだと思っていた。写真4はトレンチに見られる明らかな逆断層である。このような圧縮変形を示す逆断層はしばしばバルジの中で見られた。

フィールド会議の良さは、広大な密室に缶詰にされたようなもので、フィールドの観察に、そして会議に集中せざるを得ないことであろう。何時でも関心のある話題で誰とでも議論が出来る。東京に居れば、時間刻みでスケジュールがある衣笠さんや山崎(晴雄)さん、ウランバートルに居れば学部長の仕事で多忙を極めているバヤス教授、USGSに居れば東奔西走しているDavid Schwartzさんなど、普段は超多忙な人たちが集まっているのに、この会議の間中はモンゴルの大自然のとりこになったようなもの。インターネット

を開いて交信することも出来ないから、多忙な研究者にとってはモンゴリアンホリデイといった感がある。

話すこと議論することに疲れてくると、関心が食事に向かう。モンゴル科学技術大学で準備した厨房はゲルの中。食事は予想外に素晴らしかった。すべてウランバートルからトラックで運んだ野菜や加工食品食材と現地調達した羊が材料。1週間で5頭の羊を平らげたという。羊は1頭50ドルで現地調達である。

広大なモンゴルの高原の中に居ながら、限られた生活行動範囲。車がなければどうしようもないので、どうしても集団行動になる。それは参加した世界中の人たちとの交流を深めてくれる。参加者はアメリカ4名、イギリス2名、フランス5名、イタリア3名、ギリシャ1名、スウェーデン1名、スイス1名、スペイン1名、イスラエル1名、ニュージーランド4名、フィリピン1名(東工大学生)、中国3名、韓国2名、日本5名、そのほかモンゴル科学技術大学から学生を含めて10名弱、モンゴル科学アカデミーから3名、車両運転手、食事係など総勢60名強。モンゴルからの参加者にはJICAの専門家派遣でモンゴルに滞在する窪田さんが参加され、モンゴル事情をいろいろと教えてもらった。

会議では、私はイタリアの地震・火山活動に関する講演、中国の活断層の講演、スウェーデンの特殊な活断層の話などに興味を持った。興味を持てば何時でも議論が出来る。会議は、モンゴル科学技術大学で準備した大型テント(幅6m、長さ9m)の中で行われる。テントの中にスクリーンを掛け、プロジェクターでパワーポイントが使える。電源は小型の発電機。コンピューターやデジカメの充電にも使える。天気さえ良ければテントの周りにポスターセッションのようにポスターを貼る。それで、立派な大都市の会議場よりも



写真5 ブルネイ断層を追うフィールドツアー。白破線の間が断層擾乱帯でバルジとデプレッションが「ミ」の字型に続く。

内容のある会議になったと感じるのは、同じ釜の飯を食う中で仲間意識ができたためであろう。

キャンプNo.1に3泊し、その周辺の断層トレース巡検を終え、7月25日は朝からキャンプNo.2に移動。60人の民族大移動である。キャンプNo.1から断層を追いかけて50kmほど西のキャンプNo.2に。断層を見ながら、議論しながらの移動はまことに楽しい。大陸の気候であるので、天気さえ良ければ昼間は30℃近くに気温が上がる。半袖半ズボンで十分活動できる。夜になると10℃以下に下がるのが嘘みたいである。

キャンプNo.2でも3日を過ごした。結局ブルネイ地震断層の中心部分を東西に100km程度追いかけたことになる。また、ブルネイ地震に先駆けてその2週間前に起こったM:8.1のツェツェルレグ地震で生じた断層もキャンプNo.2をベースにして調査に行った。車での移動、ポイント・ポイントで車を降り断層のトレースをする。結局断層に沿う全走行距離は200kmほどになったのである。行けども、行けどもバルジとデプレッションの地形が続くので、断層の走っている場所を目で追いながらそれと平行に道なき道を守る。それでも、とても端から端まで見ると言うわけには行かない。370kmの断層延長の内100km程度をざっと見た、20km程度を詳しく歩いた、という程度であった。写真5はバルジやデプレッションが連続している断層を巡検している写真である。

写真で見られるようにバルジやデプレッションの大きさは2m程度の高まり、1-2m程度のくぼみ、であり

それが直線状に続くので断層だという説明をなるほどと聞くのであるが、どうも迫力がない。ところが、衛星画像で見るとブルネイ断層はまことに明瞭に追跡できる。

第3図は50万分の1トソンセンゲル (Tosoncengel) 地形図幅の一部を示したもので、ブルネイ断層の主要部分がこの地図に含まれる。断層の位置記入はモンゴル科学技術大学によるもので、会議参加者に配布された資料からの引用である。モンゴルの地形図は50万分の1、10万分の1が整備されているが、ロシアが作成したもので、すべてロシア語である。

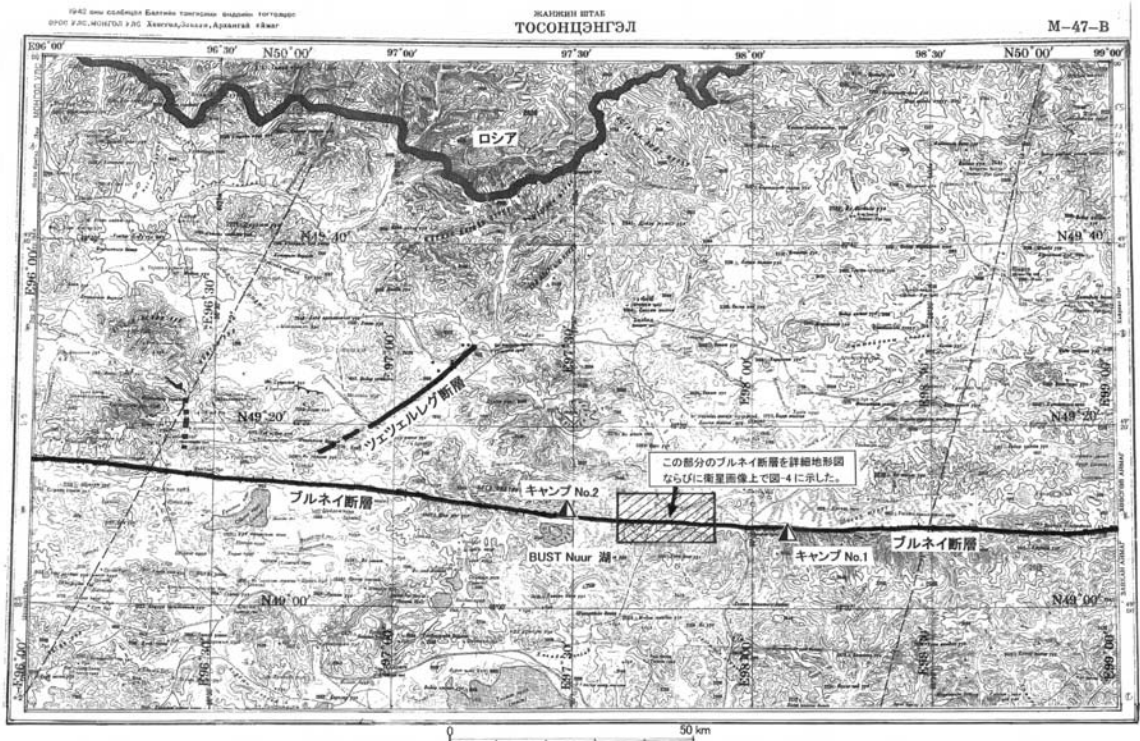
この図幅の中をほぼ東西に走るブルネイ断層は図幅内だけで約220kmの延長がある。ブルネイ断層はこの図幅の東にさらに約30km、西に約130km延長するが、この図の範囲がブルネイ断層の中核部であり、今回の現地会議もおおむねこの地図の範囲での行動になった。この図の中に注書きをつけた枠で示した部分の詳細を、10万分の1地形図およびその部分の衛星画像で第4図に示した。衛星画像はランドサット画像で、分解能は15m程度であるが、ブルネイ断層の分布は明瞭に追跡できる。

第4図に示した例と同じように、ブルネイ断層は、ほぼ全延長に亘って衛星画像上でも追跡できる。拡大していくと、15mの分解能の衛星画像でも、プリアパートベースン構造や、エシェロンの窪みに水がたまって池が点々と連なる、ミシン目エシェロン構造まで見ることが出来る。

5. 活断層地形とはどんなものか

ブルネイ断層に沿う活断層地形の代表的なものはエシェロンである。バルジと呼ぶ小高い隆起部分と、デプレッションと呼ぶ陥没凹地とが繰り返り現れるのがもっとも典型的なものである。陥没凹地の中心には水が溜まり小さな池になっているところが多くある。これをもし上空から見たとしたら、池が点々と連なるのがミシンの穴のように見えるということから、ミシン目 (Sewing Eyes) スタイルのエシェロンなどと呼んでいる。また、左横ずれ断層の特徴として、このバルジとデプレッションの並びは上から見て“ミ”の字の形をとる。

地形が大変ゆったりとしたモンゴルの大草原に1-2mの高まりを持つバルジと1-2mの窪みからなるエ



第3図 今回の会議にモンゴル科学技術大学で準備し参加者に配布された50万分の1地形図幅。ブルネイ断層全延長の中央部分60%程度がこの図幅に示されている。図中に示した枠内の詳細を第4図に示す。

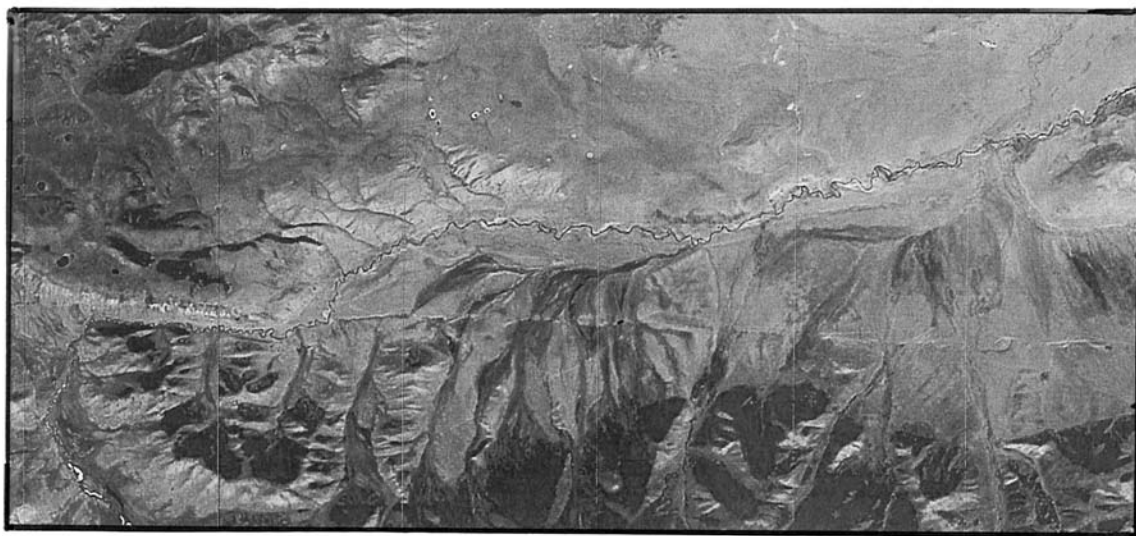
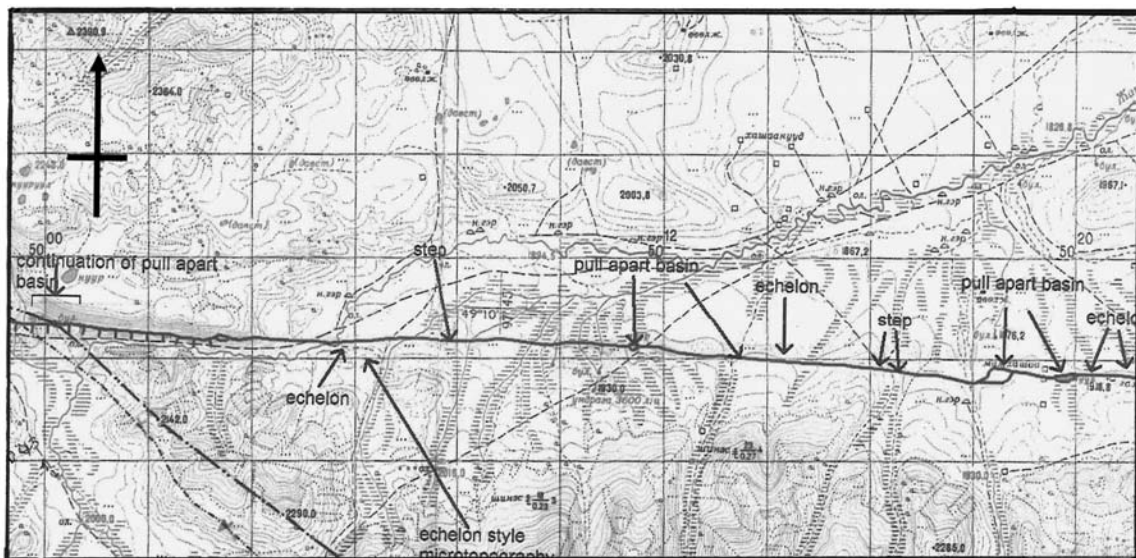
シェロン断層地形は迫力のある断層地形とはいええない。肉眼で見るとかなりの凹凸があることがわかる。もちろん写真でも凹凸が出るのだが、迫力のある写真を撮れない。自分ではわかるのだが、人に説明するのに、なるほどきれいな断層地形だと言ってもらえるものが撮れないのである。衛星画像の方が、断層地形が延々と続く状況が良く追跡でき、迫力がある。しかし、衛星画像では細部が見えない。

そこで、会議の合間にキャンプNo.2の目の前に連なるエシェロン構造をマッピングすることにした。マッピングした結果を、第5図に示した。久しぶりにコンパスと歩測でマッピングをし、ポータブルGPSでバルジの尾根を、デプレッションの周りを歩いてトラックを作る。キャッチできる衛星数が多いので精度のあるGPSマッピングができる。

この図からバルジと呼ぶ隆起土塊の単体の大きさが幅10-20m程度、延長が50m程度であることや、デプレッションという窪みの大きさも幅10m程度、延長20-30m程度のものであることが理解できよう。バルジの高まりは1-2m程度である。とくにこのマッピング

をした範囲の西側(第5図左側)の5個のバルジと、それに挟まれる4つのデプレッションは形も揃っており、典型的なエシェロンの形、あるいはミシン目スタイルのエシェロンといえる。

左横ずれ断層での垂直変位がないとすれば、そして地表までストレートな1本の直線的な断層ラブチャアが出現したとすれば、ふくらみも窪みもない、直線状の単純横ずれ断層が出来ても良いはずである。扇状地・段丘のような平坦な地形部で、このような単純横ずれ断層ラブチャアが出来たとすれば、100年の時間の中で繰り返される凍結融解などによって断層の痕跡がわからなくなってしまうに違いない。断層を追いかけていくとそういう部分もあるのだが、大部分の断層延長では、エシェロンが出来ているために100年経った現在でも断層を追えるのである。ふくらみや窪みを作りながら延々と連なる断層地形を示すのは表層部分でせんだん変形的あるいは圧縮場と引っ張り場ができ、圧縮変形したバルジの高まりと引っ張りで割れ目ができた。割れ目は、そこに周囲のバルジなどから土砂が崩れて埋めていき、現在見られるようなデ



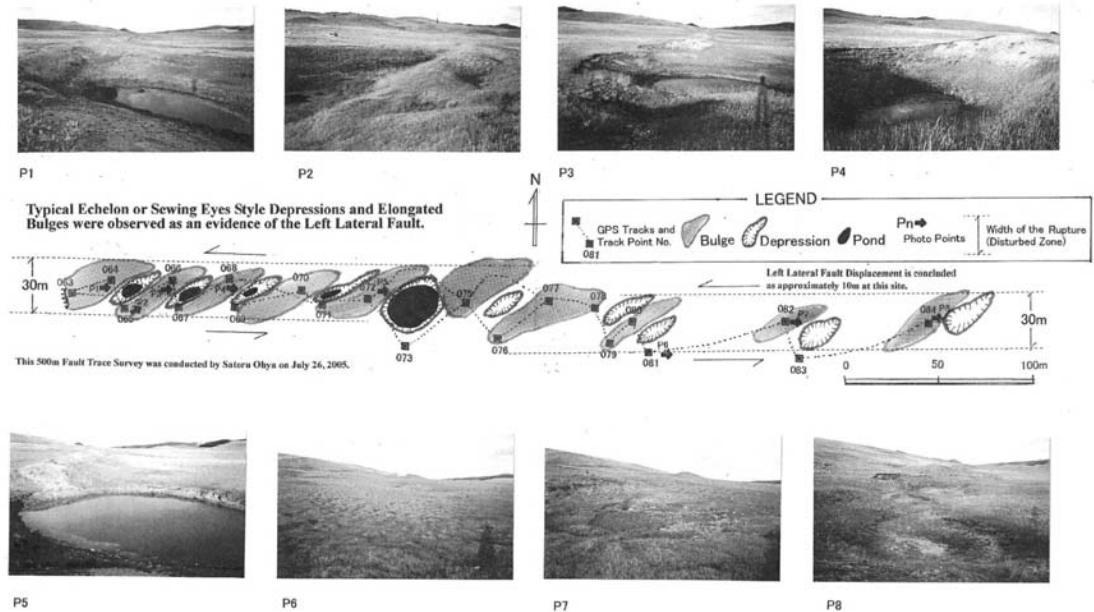
第4図 調査結果をまとめた地図と同範囲、同縮尺の衛星画像の対比。
 地形図に示される断層位置や断層の特徴的な地形説明はモンゴル科学技術大学による。
 断層はこの範囲では大部分が扇状地・段丘上を走る。ミシ目エシェロンやプルアパート陥没などが衛星画像でも追える。
 場所はキャンプNo.1, No.2の中間部で第3図に示した範囲。
 地形図のグリッドは南北とも2km。

プレッションを作ったと考えられる。なぜ、このような規則的なエシェロンができるのだろうか。

マッピングした部分の西側部分とその部分のパノラマ写真との対応を示したのが第6図である。写真を撮った位置がデプレッションNo.1の北側であり、バルジNo.1とデプレッションNo.1が大きく写っているがマ

ッピングの結果と比較すればNo.5のバルジまで、バルジの規模もデプレッションの規模もあまり変わらないことが理解できよう。バルジの隆起の程度やデプレッションのへこみの程度も写真ではなかなか分かりにくい。第6図のパノラマ写真にはバルジ部分に網掛けをしてわかりやすくしている。

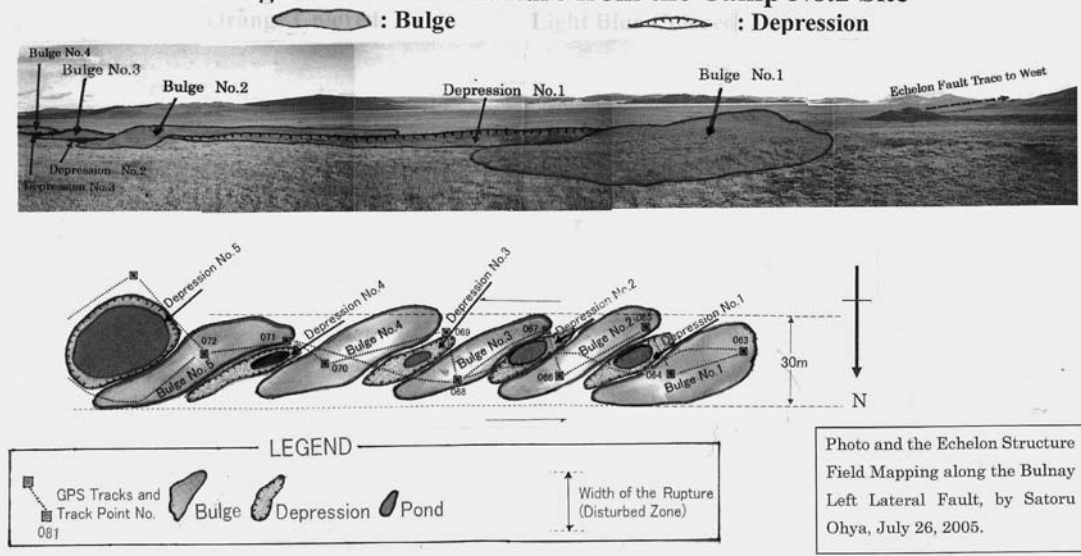
Surface Rupture Trace of the 1905 Bulnay Earthquake Fault
at Camp No.2 Site Located at North of the Bust nuur (lake)



第5図 ブルネイ地震断層の断層地形マッピング(キャンプNo.2近く). バルジとデプレッションが規則的に並ぶミン目エシェロン.

Surface Rupture Trace of the 1905 Bulnay Earthquake Fault
at Camp No. 2 Site Located at North of the Bust nuur (lake)

150 Degree Panorama Picture from the Camp No.2 Site



第6図 ブルネイ断層の典型的な断層地形ミン目エシェロンのスケッチとパノラマ写真. 地震直後では今中心に池が出来ている細長いデプレッション部は割れ目であったと推定される.

このようなエシェロンが出来た理由は、おそらく、地下のある深さになると岩盤があり、そこでは直線的なずれが出来ているのに、表層部にある土壌部分がある幅で変状してバルジを作ったり、引っ張り割れ目を作ったと考えられる。しかし、扇状地地形の地下には相当厚い堆積物があるわけだし、その厚さも場所によって変化しているに違いない。断層地形に表層の厚さが関係するとすればもっと場所によって異なった形、例えば同じエシェロンでも大きなエシェロン、小さなエシェロンがあってよいように思える。

いろいろ考えている中でヒントになるのは、冬はマイナス40-50℃となる極寒の地であること、夏でも数m以下にはパーマフrostが存在するということである。もし、凍結した永久凍土は剛性が高く、岩盤と同じような挙動をとり堆積物の全体の厚さにかかわらず、凍土が融解して土壌化している部分はどの場所でも数m程度であり、土壌化している深さ範囲は全体に亘ってあまり変わらないと仮定すると、どこまでも比較的類似したエシェロン構造ができることを説明する理由になるかもしれない。もし、そうであるとすれば、永久凍土があるという条件、地震が起こったのが7月であり、堆積層の深さに関係なく、全域的に似たような凍土から数mの深さ範囲で融解した表層土壌があったという特殊な条件が、30m程度の変状帯幅でミシン目エシェロンを作る条件になったのではないかと考えられる。

マッピングした範囲の西側の250mほどの区間には6つのバルジと6つのデプレッションが規則的に並んでいる。しかもデプレッションの中心には大きさは多少異なるが似たような池があり、ミシン目スタイルのエシェロンになっている。マッピングした東側の250mの区間には明瞭な隆起や陥没がない部分があるが、基本的には類似した構造地形が見られる。これで見ると、西側のバルジとそのすぐ東側のデプレッションがワンペアの断層地形になるように思える。

第5図のP8の写真に見られるように、マッピングした範囲の東の端からさらに東には、まだまだバルジとデプレッションが続いている。500m区間のマッピングは断層全延長から考えるとほんの僅かな区間に過ぎないが、それでもいろいろなことが分かる。

まず、エシェロンになっている擾乱帯の幅は約30m程度だということ。また、仮にマッピングした範囲のバルジに西側から番号をつければ、6番目のバルジまで

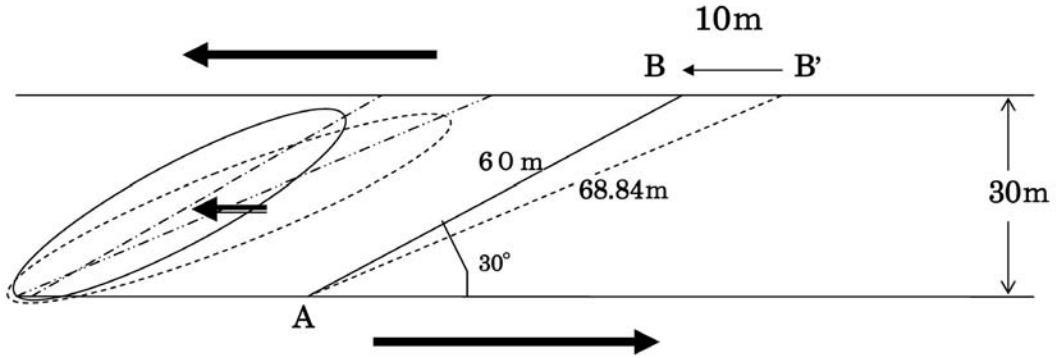
の擾乱帯の分布と7番目から10番目のバルジに至る擾乱帯の分布は、それぞれ幅30m程度なのだが少しずれているように思える。表層の地質の差によるのであろう。

断層地形沿いに歩いていくと次々にデプレッションが現れ、その中心にかわいらしい池があることが多い。中にはかなり大きな池になっているところもある。ところが緩やかな傾斜の高まりであるバルジに隠されているために、遠くから見るとバルジは分かるのだがデプレッションは見ることが出来ず、近くに行くまでは池があるかどうか分からない。

全体像を把握するには1,000分の1ないし500分の1程度の精度の高い地図が必要である。幅100-200mで断層の上を低空の航空写真で測量し精度の高い地形図が作れば、大変役に立つように思える。少なくとも50cm程度のコンターが入った地図があれば、断層地形をもとに断層のメカニズム解析に役に立つように思える。

地形があまりにもなだらかなので、自分の目の高さが地上1.5mでは、全体把握がなかなか難しい。第6図の写真を見ただけでは、マッピングしたような規則的なエシェロンがあることが分かりにくいと同じように、目で見ても遠望ではとくにデプレッションが見えないのである。

第6図には、マッピングした範囲の西半分に規則的な配列を示すバルジNo.1からNo.5までを示してある。バルジあるいはデプレッションの長軸の方向は断層延長に対して27-30°の角度を持っている。エシェロン擾乱帯の幅はほぼ30mである。断層の変位量を10mとすると、10m左横ずれした結果今の姿になったわけだから、第7図に示すように断層が動く前のA-B'が左横ずれで動いた結果A-Bになったと考えることが出来る。A-B'の長さを持つ短冊状の土塊が断層で動いてA-Bの長さの短冊に圧縮されたことになる。仮にA-Bが断層方向と交差する角度を30°とすると、計算は単純でA-Bの長さは60m、断層が動く前のA-B'の長さは約69mと計算できる。したがって、A-B軸方向に10%以上圧縮変形してバルジが出来たと考えることができそうである。トレンチや露頭で観察できる表層土壌の密度や硬さから私の土質力学的な経験をもとに判断すると、その限界圧縮率(せん断面を伴わないで圧縮が可能な限界)はせいぜい1%程度と考えられるので、10%以上も圧縮変形す



第7図 30m幅の表層部分が10m左横ずれする場合の圧縮の程度を示す。

るとなると、弾塑性変形範囲ははるかに超えているので、数多くのせん断面が出来て当然である。トレンチなどで見られる断層面は、このようなバルジ内の圧縮変形で出来たせん断破壊面で、本来の活断層のラプチャー面ではないであろう。

また、圧縮される短冊状の土塊片と隣の土塊片の間には、短冊状土塊の幅に比べると狭い割れ目、隙間が出来ることになる。これが本来のエシェロン割れ目である。断層が動いた際には深さ数10mにも達した引っ張り割れ目は、その両側の隆起したバルジから土塊片が崩れてきて、埋められていったに違いない。100年の歳月の凍結融解の繰り返しは地形をなだらかにし、尖烈な引っ張り割れ目はゆるい傾斜の窪地に変わっていったのであろう。今回のマッピング結果では、バルジNo.1からバルジNo.5に挟まれるデプレッションNo.1 - No.4の幅は7-8m、延長は30-40mである。地震直後に出来た割れ目の規模も幅数m、長さ30-40m程度ではなかったかと推定できる。

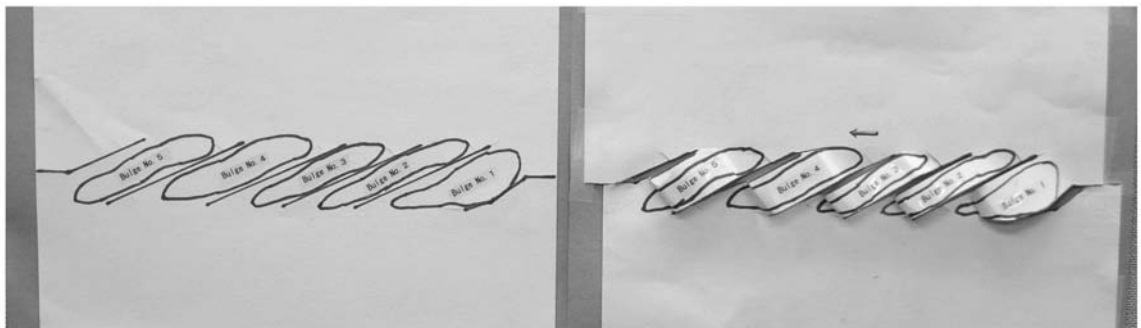
第8図左は、規則的なバルジNo.1からバルジNo5

に相当する短冊状の形を横ずれ分10m相当分戻して作ってみた紙の模型である。バルジとバルジの境界にはあらかじめカッターで割れ目(引っ張りクラック)を入れてある。これを10m相当分ずらすと第8図右のようになる。

この模型ではバルジをあらわす短冊部分はくしゃくしゃになる。実際には多くの逆断層を伴いながらふくらみを作ったと解釈できそうである。

短時間で、限られた範囲のマッピングしか出来なかったが、漠然と見てきた他の場所に比べて、自分でマッピングしてバルジやデプレッションの形状や分布を記入し、写真と比較してみたりしていると、ブルネイ断層を手で触って来たという感じが持てる。

エシェロンでバルジを作った短冊状の部分の土塊の厚さが厚ければ厚いほど、圧縮された総体積が大きくなるので、同じ圧縮率でも厚さに比例して隆起量が大きくなるはずである。概算すると、平均1mの隆起をするには短冊状の土塊の厚さ8m程度が必要になる。バルジの高さ、すなわち隆起量はエシェロン構



第8図 マッピングしたバルジNo.1-No.5に対応する断層ペーパーモデル。
左：横ずれ前の状況 右：上側を10m相当分左横ずれさせた。

造を作った表層土の厚さに関係がある。詳細なエシェロンの形状が測量できればそれをもとに数量的な解析を行うことが出来、どの程度の深さまでバルジを形成するのに関与したのかも解析できそうである。また、地震が起こった7月に凍土が融解して土壌化していた深さも推定できるかもしれない。7月に現地ボーリング調査を行ってみれば、このような仮説を裏付けることが出来る資料も得ることが出来るに違いない。

6. ブルネイ断層は最大規模の地震断層の一つ

すでに述べたように、ブルネイ断層は100年経った今でも、ほぼ全延長350kmにわたって追跡が可能な断層である。

これまでに記録された地震断層を、“The Geology of Earthquakes - R. Yeats, K. Sieh, C. Allen 著”の巻末にまとめている、世界の地震断層一覧 (Table of Historic Earthquakes with Surface Rapture, 文献1, PP 475-485) から、延長80km以上のもので1700年以後のものを選びリストアップし、第1表に示した。この本の出版後2001年に起こった崑崙地震の崑崙峠西 (Kunlun Pass W) 断層を補充してある。この表で見ると、ブルネイ断層は延長では、1906年のサンフランシスコ地震でずれたサンアンドレアス断層の432km、2001年の崑崙地震でずれた崑崙峠西断層の400kmに次ぐ、世界で3番目の長さになるが、横ずれ移動量で見ると11mというのは世界の地震断層の記録の中でも最大と言ってもよい大きなものであり、延長並びに移動量の大きさから判断して世界第一級の地震断層であることは疑いない。

また、ブルネイ断層375kmの延長は山地を切り、扇状地を切り、湖を切り、ほとんど直線状に延々と伸びるという特徴を持つ。ほとんどの部分で同じような規模のエシェロンが見られる。もちろんエシェロンは、平坦な扇状地部分で見られるのであるが、表面の地形から判断される扇状地堆積物の厚さにかかわらず同じような規模のエシェロンが見られるのが面白い。

推測するに、規模の同じようなエシェロンが出来るのは、表層部の土壌化した部分の厚さがほぼ同じであったことによるのではないかと考えられる。その理由として、すでに述べたように地震の起こったのが7月であることが関係しうである。標高ほぼ2,000m前

後の高原地帯では冬季には表層まで凍結する。夏季には凍土表層が融解して土壌化する。数mあるいは10m以下には夏でも永久凍土が存在する。表層部の物性は冬季において凍土となっている場合と、夏季に融解して土壌化している場合とでは大きく異なるに違いない。扇状地の堆積物の厚さの変化に係らず、融解して土壌化した表層の厚さはほぼ同じと考えると、エシェロンの形が同じであることの説明が出来るのではないかと思うのである。

2001年11月14日に発生した崑崙峠西地震 (Ms : 8.1) では、延長400kmにわたって左横ずれ断層が発生した。第1表に示したように世界で延長順位No.2の地震断層になる。水平移動量は数mでブルネイ断層よりも少ないようであるが、この地震は11月に起こったもので、標高も数千mの高地であり、既に表層まで凍土になっていた時期の地震断層である。

中国国家地震局では多くの地震断層調査を行ってきたが、多くは地震発生以来、数年あるいは数百年経ったものの調査で、凍土地帯ではラプチャーや断層地形が風化や凍結融解で形が変化してしまっており、崑崙峠西断層では、初めて凍土地域における地震直後の断層の様相の調査観察を実施している。まことに貴重な資料が得られた。この調査で得られた写真記録は「Album of the Kunlun Pass W. Ms: 8.1 Earthquake, China」という写真記録集にまとめられた(文献3)。

参考に、この写真集から代表的なラプチャー写真を写真6、写真7に示した。地震直後であるだけにラプチャーはまことに荒々しい様相を示している。とくに表層まで凍結した状況にあることから、モンゴルのバルジやデプレッションに比べると凄絶である。ブルネイ地震でも地震直後にはこのような荒々しいラプチャーが見られたのかもしれないが、トレンチ断面などの観察からは、ブルネイ断層では表層が融解した土質地盤になっていた夏季の地震であることから初めから崑崙峠西断層で見られるようなコンクリートスラブが圧縮破壊したような鋭いラプチャーにはなっていないように思える。

中国やカリフォルニア、トルコなどには似たような規模の左横ずれ、右横ずれ断層が多く存在する。地震発生の時期や表層地盤条件の異なる多くの断層に接し、その観察をもとに検討を深めることが活断層の研究には重要であろう。

第1表 1700年以降の80km以上の長さを持つ地震断層一覧表.

	地震名	M	Date	Region	Type	Length km	Hor. Displ.	Vert. Displ	Fault Name
1	San Francisco	7.9	19060418	California	RL	432	6.1(m)	(m)	San Andreas
2	Kunlun Pass W	8.1	20011114	China-Tibet-Qinghai	LL	400	6	0-2	Kunlun Pass W
3	Bulnay	8.2	19050723	Mongolia	LL	375	11	3	Bulnay
4	Erzincan	7.8	19391226	Turkey	RL	360	7.5	2	NAF
5	Norsatabad		1838	Iran		325			
6	Lituya Bay	7.9	19580710	Alaska	RL	95-280	3.5-6.5		Fairweather
7	Ladik	7.5	19431126	Turkey	RL	270	4.5		NAF
8	Gpbi-Altay	8.3	19571204	Mongolia	LR	250	8	9	Bogd
9	Haiyuan	8.6	19201216	China-Tibet-Qinghai	LR	237	10-11	4.7	Haiyuan
10	Motagua	7.5	19760206	Guatemala	LL	230	3	0.2	Motagua
11	Tuosuohu	7.5	19370107	China-Tibet-Qinghai	LR	230	8	6	Kusaihu-Maqu
12	W. Mongolia		17611209	Mongolia	RR	>215	5-7	2	Hovd
13	Chon Kemin	7.8	19110103	Kyrgyzstan	RE	200	4		Chon Kemin
14	Bolu-Gerede	7.5	19440201	Turkey	RL	190	3.5		NAF
15	Fuyun	8.0	19310810	China-Xinjiang	RL	180	14.6	3.6	Keketuohai-Ertai
16	Dongchuan	7.7	17330802	China-Tibet-Qinghai	LL	150	10.5	2	Xiaojiang
17	Changma	7.6	19321225	China-Tibet-Qinghai	LR	148.5	6.2	1	Changma
18	Manas	8.0	19061223	China-Xinjiang	RE	146		0.58	Tugulu-Dushanzi
19	Kanto	7.9	19230901	Japan	RE	130	1.2-6	0.65-3	Sagami(submarine)
20	Tsetserleg	7.8	19050709	Mongolia	LR	130	2.5	2.5	Tsetserleg
21	Central Luzon	7.8	19900716	Philippines	LL	125	6.2	2	Philippine Digidig
22	Songming	8.0	18330906	China-Tibet-Qinghai	LL	110-120	9-10	2	Xiaojiang
23	Owens Valley	7.6	18720326	California	RN	108	10	4.4	Owens Valley
24	West Wairarapa	8.2	18550124	New Zealand	RL	85-105	13.5	1.5	Wairarapa
25	Cerro Prieto	7.0	19341231	Mexico	RL	100	3-4		Cerro Prieto
26	Sbckaa Valley	7.4	17591125	Lebanon	LL	100	?		Yammounch
27	Nileke	8.0	18120308	China-Xinjiang	RL	100	4		Kaxhe
28	Luhuo	7.6	19730206	China-Tibet-Qinghai	LL	90	3.6	0.5	Xianshuihe
29	N. Anatolian		17840723	Turkey	RL	90			NAF
30	Xichang	7.5	18500912	China-Tibet-Qinghai	LL	90	7	5.6	Zemuhe
31	Dari	7.7	19470317	China-Tibet-Qinghai	LR	90	5	5-6	Richa-Keshoutan
32	Pinglu	8.0	17390103	Eastern China	RN	88	1.45	0.95	Helanshan
33	Landers	7.3	19920628	California	RL	85	6	>1	Johnson Valley
34	Tabas-e Golshan	7.5	19780916	Iran	RE	85		3	Tabas
35	Rudbar Tarom	7.7	19900620	Iran	LR	84	0.6	1	Baktor
36	Danxiong	7.3	19511118	China-Tibet-Qinghai	RL	81	7.3	1.5	Bengco
37	Dasht-e Bayaz	7.1	19680831	Iran	LL	80	4.5	2.5	Dasht-e Bayaz
38	Gangra	?	1950????	Turkey	RL	80			NAF
39	Murduun Valley	7.4	19670722	Turkey	RL	80	1.9	1.2	NAF
40	Nobi	8.0	18911028	Japan	LL	80	1.2-8	1.8-6	Neodani

ソース：R. Yeats, Kerry Sieh and Clarence Allen著

The Geology of Earthquakes, Oxford University Press 1997 Kunlun Pass W 2001は追記

タイプに示した記号の説明：

- LL：左横ずれ断層
- LR：左横ずれ並びに逆断層
- LN：左横ずれ並びに正断層
- RE：逆断層
- RL：右横ずれ断層
- RR：右横ずれ並びに逆断層
- RN：右横ずれ並びに正断層
- NN：正断層

7. 終わりに

今回のような大陸内部の横ずれ型活断層の調査は、私にとって初めての経験であった。これまでに見てきた地震断層は1971年のカリフォルニア・サンフェルナンド地震でできた数十センチの落差を持つサン



写真6 崑崙崱西断層(左横ずれ)のラプチャーの写真(庫賽湖の西15km). 中国崑崙崱山口西8.1級地震図集:中国地震局, 2002より引用(文献3).

ガブリエル山麓部のスラスト型断層や、兵庫県南部地震で出来た野島断層をはじめ多くが圧縮場の垂直変位成分の多い断層であったので、大陸内部の地震に多い水平成分が主体の活断層を見る機会がもてたのは幸いであった。久しぶりに、自然に接し、大きな地殻運動の痕跡に接し、センス・オブ・ワンダーを磨く機会になった。フィールドで自然に接し、自分に質問して答えが出てこない問題を多く抱えた会議であった。

ブルネイ断層を追い、世界の大地震断層の記録を見て疑問に思うのは、何故何百kmもの延長の断層が動くのであろうか、動かなければならぬのであろうか、ということであった。このような大延長の断層を動かした地震の震源深さはたかだか20-30kmに過ぎない。こんな浅い震源の地震が震源深さの10倍以上の距離の地殻を動かすのは何故なのだろうか。

特徴的なことは、延長の大きな地震断層の殆どが垂直変位成分を持たない横ずれ断層であり、直線性の高い断層である。北アナトリア断層の場合も同じである。上盤側の地殻を持ち上げるスラスト型の断層では、持ち上げるのに大きなエネルギーを必要とすることは間違いないわけだから、同じエネルギー放出でも横ずれ断層の場合には延長で稼ぐということなのだろうか。それにしてもこれらの大横ずれ断層の変位量は、大きくても10m程度である。300kmの延長に対して10mの変位はひずみ率で言えば10/300,000、わずか0.003%に過ぎない。せいぜい100km延長の断層の動きの中で吸収できてよいのではないかと思うのである。

この疑問に対する答えは、1)既に存在している活断層(弱線)に沿って動いたこと、2)既存の活断層が

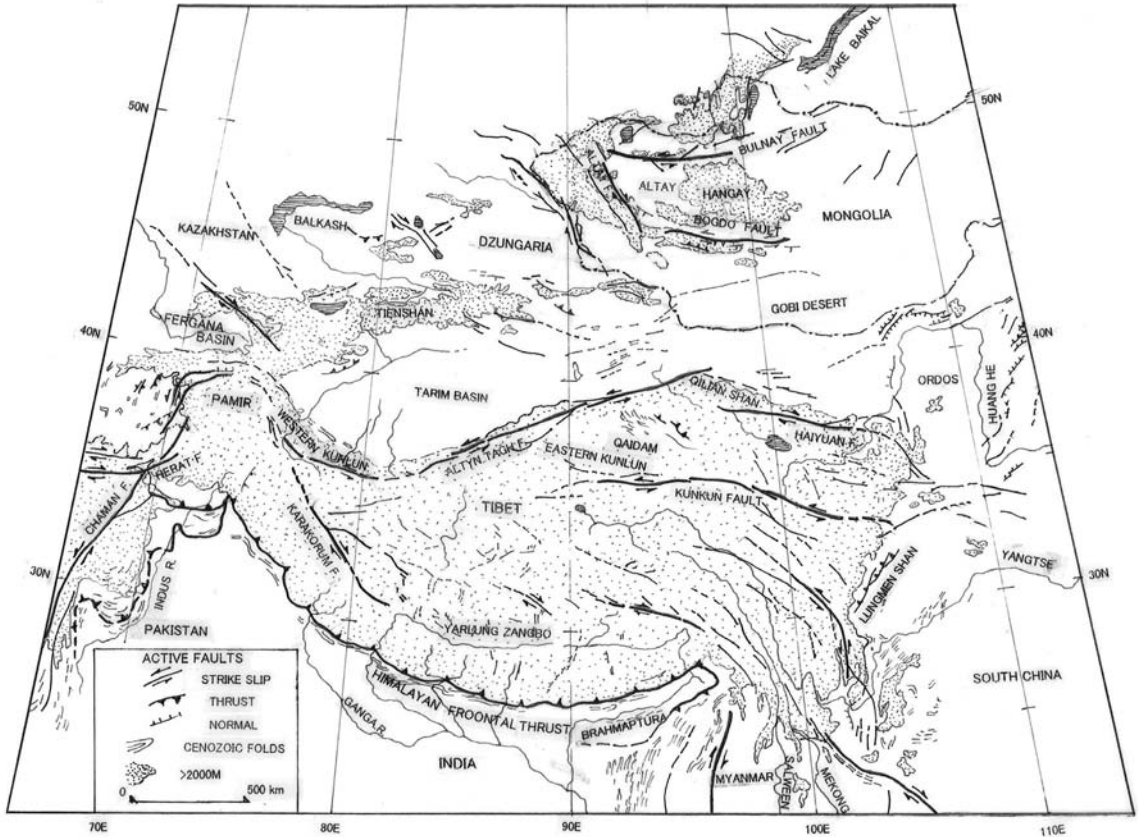


写真7 崑崙崱西断層(左横ずれ)のラプチャーの写真(青藏公路(Quinghai-Tibetan Highway)の西5km). 中国崑崙崱山口西8.1級地震図集:中国地震局, 2002より引用(文献3).

コンクリートスラブを破壊したような荒々しさは表層まで凍土となった11月の地震発生によると考えられる。

直線的な形状分布をし、断層の動きを止めるような屈曲した形状になっていないこと、3)断層面がシャープで変質を受けた断層破碎帯など、あらかじめ滑りやすい面が準備されていたこと、などを挙げざるを得ない。北アナトリア断層に沿って次々に地震が起こり、地震断層が西に延長しながら動いていった例などから考えて、地震により活断層に集積されたひずみ・応力が再配置され、次々にマイグレートする形で地震が起こるメカニズムを研究することが、私の疑問の解になるのかもしれない。また、このような延長の長い地震断層がほとんど大陸内部の地震で起こっていることも一つのヒントになるのかもしれない。

2004年12月に発生したスマトラ・アンダマン諸島地震ではサブダクションでも1,100kmに及ぶ信じられない規模の地殻破壊が起こった。それがインド洋大津波を引き起こした。だから、何も延長の長い地殻破壊が起こるのは、大陸内部の横ずれだけではない、対面する地殻を衝上するサブダクションだって起こるケ



第9図 中央アジアからモンゴルにかけての主要な地質構造 (Avouac and Tapponnier, 1993 (文献4) の図にモンゴルの構造を加筆).

ースがあるのだ、と言われるかもしれない。私はスマトラ・アンダマン諸島地震の余震域の広がりやUSGSの報告で見て、その規模の大きさに鳥肌が立つ思いがした。何故日本の本州全域に匹敵するような延長1,100km、幅200kmに及ぶような地殻破壊が起きなければならなかったのか、大変疑問に思った。自問して答えが見つからなかった。

この疑問に解が与えられたとすれば、南海トラフに沿って今後数十年以内には間違いなく起こる東南海地震、南海地震が300km延長の同時地殻破壊を起こす大地震になる可能性、メカニズムの研究に役立つに違いない。

スマトラ・アンダマン諸島に沿うインド・オーストラリアプレートのサブダクションは日本に太平洋プレートが沈み込むのに比べると、沈み込みの方向がオプリークであるという特徴がある。スマトラでもオプリーク・サブダクションであるが、そしてそのメカニズムがスマ

トラ島のスダ海溝に面する部分を引きずり、大スマトラ断層(右横ずれ)を作る理由になっているのではないかと考えられているが、サブダクション境界はアンダマン諸島付近ではさらに北に方向を変え、ほとんどプレートの動きに対してオプリーク・サブダクションどころではなくストライク・スリップ・サブダクションと言ってよい状況にある。サブダクションではあっても限りなく横ずれ断層に近い動きになっていることが、1,100kmにも及ぶ地殻変動を起こした理由なのではないか、と思ったりする。

ブルネイ断層を動かした地質構造を中央アジア、東南アジアの主要断層にあわせて示した図を第9図に示した(文献4の図に加筆)。この図から、ブルネイ断層の動きは、モンゴル南部のゴビアルタイ・ボグド断層、タリム盆地南部のアルティンタフ断層、崑崙断層などと整合的な動きをしていると見ることが出来る。ブルネイ断層を動かした原動力はインド・オーストラリ

アプレートが衝突して、ヒマラヤを持ち上げ、さらにユーラシアプレートを北北東に圧縮している運動の場中の現象として考えてよいように思える。

それにしてもヒマラヤ南部の衝突が、その境界から優に2,000km以上の距離のあるモンゴルのブルネイに世界第三位の大陸内地震断層を作る原動力になっているとすれば、この衝突のエネルギーの凄まじさには、驚くばかりである。もし、ブルネイ地震・断層が東にマイグレートして、ブルネイ断層東端から、さらに東に300km延長の断層を作るような地震、地殻変動が起こる可能性があるとするれば、その地震断層の東の端はモンゴルの首都ウランバートルに近づく。耐震を配慮した設計が殆どされていない構造物の多いウランバートルの地震防災を考える上で重要であり、今後の研究が待たれる。

謝辞：最後になるが、私にとってブルネイ断層上でのフィールド会議は大変有意義なものであった。構造地質に関する疑問、思索はフィールドから生まれるものが多い。私はウランバートルの地震防災に関係していることもあり、大陸内部の地震に関心を持ってきたが、これまで参加したどんな国際会議より、有益な会議であった。

フィールド会議を通してご指導いただいた、モンゴル科学技術大学のバヤス(Bayasgalan)教授、共同企画者である東工大衣笠善博教授、会議に参加された山崎晴雄首都大学教授、井上大栄氏(電力中央研究所)、栗田泰夫氏(産総研)には多くのことを教えていただいた。記して感謝する次第である。会議中、参加者の中で多分最年長者であった私に気を遣っていただき、楽しい会議の中ではもっともしんどかったバンピーロードを走る車での移動中でも、最も揺れが少ないシートに座らせていただいたりした。まことに感謝にたえない。

また、このフィールド会議を成功に導いた裏方、運転手、食事係などモンゴルのスタッフに感謝する次第である。

この時期、モンゴルの大草原には私には名前の分



写真8 モンゴルには自然が豊富 高山植物がこの旅を一層豊かにしてくれた。

からない高山植物が咲き乱れていた(写真8)。とくにモンゴリアン・エーデルワイスはどこにでも、まるで雑草のように咲いていた。フィールドを歩く楽しみを倍化させてくれた。モンゴルの自然に感謝である。

参 考 文 献

1. Yeats, Robert S., Sieh, Kerry, Allen and Clarence R. (1997) : The Geology of Earthquakes, Oxford University Press.
2. Florensov N.A. and V.P. Solonenko (1963) : The Gobi-Altai Earthquake, Izdatel'stvo Akadimii Nauk SSSR, Moskva; (1965) : Translated by Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
3. 宋端祥他, (2002) : 中国崑崙山口西8.1級地震図集, 中国地震局, 地震出版社.
4. Avouac, J.P., Tapponnier, P., Bai M., You H. and Wang G. (1993) : Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. Journal Geophys. Res. 98, pp 6755-6804.
5. Bobrov, V.A., V.I. Agushev, I.F. Derpaskin and D.N. Leont'ev (1958) : Gobi-Altai skoe zemletryasenie 4 dekabrya 1957 g. (The Gobi-Altai Earthquake of 4 December 1957), Gosdudarstvennye geologicheskie fondy MNR, Ulan-Bator, Inventarnyi No. 546.
6. Bobrov, V.A., S. Baldan and N.A. Marinov (1959) : Gobi-Altai skoe zemletryasenie 4 dekabrya 1957 g. Goviin Altaid Bolson gazar khedel (The Gobi-Altai Earthquake of 4 December 1957), Ulaanbaatar (Ulan-Bator).

OHYA Satoru (2006) : Tracing an Earthquake Fault in Mongolia.

<受付: 2005年9月7日>