

丹那断層北端部における断層変位地形の分布形状

Geometry of fault traces on the northern terminal of the Tanna fault in Izu Peninsula, Central Japan

吾妻 崇¹・林 舟²

Takashi Azuma¹ and Zhou Lin²

¹ 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center, t-azuma@aist.go.jp)
² 浙江大学理学部地球科学研究科 (Department of Earth Science, Zhejiang University, China)

Abstract: We conducted a light detection and ranging (LiDAR) on the northern end of the Tanna fault, central Japan, to obtain a 0.5 m DEM to trace small scarplets and offset along the fault. For an evaluation of a magnitude of earthquakes generated from active faults, it is important to decide terminal points. It is, however, difficult to find them, because a displacement is getting small and traces are branched off toward terminals. Airborne LiDAR is a useful tool to measure detailed topographies, and to find fault scarps especially for places covered with trees. Between the Tanna fault and the Hakonemachi fault, there is a gap of earthquake faults at the 1930 Kita-Izu earthquake (M 7.3). From a result of detailed analysis of topography with 0.5 m DEM, active faults in this area are separated into two types. NW-SE trending traces with right steps are interpreted as surface ruptures around the end of the Tanna left-lateral fault, whereas E-W trending traces on the rim of the Hakone caldera seems to be caused by gravity-control on the summit of mountains.

キーワード: 活断層, 丹那断層, 航空レーザー測量, DEM, 断層変位地形, 断層端部, 幾何学形状
Keywords: active fault, Tanna fault, airborne LiDAR, digital elevation model, tectonic landform, terminal of fault, fault geometry

1. はじめに

本研究では, 航空レーザー測量を実施して取得した丹那断層北端部の詳細な地形標高データ (DEM データ) に基づき, 微細な断層変位地形を抽出して活断層分布図を作成し, 断層端部における断層分布形状について考察した。

活断層の端部における断層分布形状は, 端点の位置, すなわち, 活断層の長さを決めるうえで重要である。また, 活断層のセグメント区分に関する研究 (吉岡ほか, 2005 など) や地震時における破壊停止地点の予測に関する研究 (Wesnousky, 2006 など) においては, 活断層の隔離距離が重要な指標となるため, 活断層の端部の詳細な分布形状が不可欠な情報とされる。しかし, 活断層の端部においては, 断層トレースの分岐や変位量の減少によって個々の断層変位地形が不明瞭になり, 活断層の認定が困難になる傾向がある。

近年, 航空レーザー測量技術を利用した地形計測により, 広域にわたって詳細な標高データを得ることが可能である。また, 植生に覆われた場所においてもわずかな隙間を利用して地表高度を計測するため, 従来の空中写真判読では検出できなかった植生下の微細な断層変位地形を抽出することができる。

さらに, 計測されたデータからメッシュデータを作成することにより, 地形断面の作成などの地形解析作業が容易となる。そこで本研究では, 断層端部において詳細な DEM データを作成し, 微細な断層変位地形の検出を試みた。本研究では DEM データを用いた地形解析のみによって活断層トレースを認定したが, これらについては現地を確認調査を実施する必要がある, その結果については別稿にまとめる予定である。

2. 対象地域

丹那断層は, 伊豆半島北部の静岡県田方郡函南町から伊豆の国市 (旧韮山町) にかけて分布する長さが約 15 km の活断層である。この活断層は, ほぼ南北走向の左横ずれ断層であり, 横ずれ成分の平均変位速度については約 2 m/千年と算出されている (久野, 1936 など)。この断層は, 1930 年に発生した北伊豆地震 (M7.3) のときに活動した地震断層の主たる区間であり, 変位量 2~3 m の左横ずれを伴う地表地震断層が生じたことが報告されている (井原・石井, 1932, 1933 ; Otuka, 1933 ; 松田, 1972)。

1930 年北伊豆地震では, 丹那断層よりも北方に位置する箱根町断層と茨ヶ平断層, および南方に位置

する浮橋西方断層，浮橋中央断層，田原野断層，大野断層，加殿断層，姫之湯断層で地表地震断層が生じ，その全長は約 30 km に及んだことが知られている（第 1 図）．丹那断層と箱根町断層との間の約 5 km の区間について，井原・石井（1932, 1933）は田代盆地の北方約 1.5 km まで「新断層」（地表地震断層のことと推定される）を示しており，松田（1972）はほぼ同じ地点まで不明瞭ながら地表地震断層を示している．一方，都市圏活断層図「熱海」（八木ほか，1996）では，丹那断層に沿った 1930 年北伊豆地震の地表地震断層の分布の北端は，田代盆地の北縁から約 500 m 北の地点とされている．

本研究では，1930 年北伊豆地震に伴って地表地震断層が生じた区間のうち，丹那断層の北部から箱根町断層にかけての範囲を対象地域とした．この地域を選んだ理由は，一回の断層活動で山地内に形成された微細な断層変位地形を地震後数十年経ってから空中写真判読で検出することは困難であるが，詳細な DEM データを用いることにより検出できる可能性が期待されたためである．対象地域は箱根火山の南部にあたり，対象地域の北部にはカルデラの外輪山が東西に横切っており，標高は 1000 m 以上に達する．外輪山の外側（南側）には西へ向かって傾き下がる火山麓斜面が広がり，その斜面の途中に田代盆地，丹那盆地が南北に連なって分布している．

対象地域に分布する活断層については，活断層研究会編（1991）のほか，都市圏活断層図「小田原」（宮内ほか，2006），「熱海」（八木ほか，1996）および中田・今泉編（2002）に詳細な分布が図示されている．これらの資料では，田代盆地と芦ノ湖の間に北北西－南南東走向で西上がり成分を伴う活断層と東西方向の活断層が複数存在していることが示されている．また周辺には，田代盆地の東側に南北走向の左横ずれ断層（軽井沢断層：井原・石井，1932, 1933）が，さらに東方の山地内に北西－南東走向の複数の右横ずれ断層（熱海峠断層，相の原断層，瀧地峠断層など：井原・石井，1932, 1933；活断層研究会編，1991）などが分布する（第 2 図）．

3. DEM データの作成

丹那断層北端部の詳細な地形を明らかにするため，航空レーザー測量を実施して 0.5 m メッシュの DEM データを作成した．計測を行なったのは，丹那断層北部にあたる静岡県田方郡函南町南東部から，箱根町断層の南部にあたる神奈川県足柄下郡箱根町の芦ノ湖南端部にかけての長さ約 10 km の区間について，丹那断層をほぼ中心とする幅約 2.5 km の範囲である（第 2 図），計測作業は 2010 年 3 月および 4 月に実施し，3 月の計測には固定翼機を，4 月の計測には回転翼機を使用した．固定翼機の飛行高度は，基準面に対する対地高度で 1645.9 m（海拔高度では

2145.9 m），回転翼機の飛行高度は同対地高度で 914.4 m（海拔高度 1414.4 m）であった．計測誤差は 25 cm 以下である．計測データからノイズを除去して三次元計測データを作成し，さらに自動及び手動のフィルタリング処理を施してグラウンドデータとした後にグリッドデータを作成した．グラウンドデータの取得密度は，多いところでは 5 m 四方のエリアに対して 500 点以上に及ぶ（第 3 図左）．また，各グラウンドデータの計測位置をモノクロ陰影図のうえにプロットして，実際に標高が計測されている地点の確認を行った．このようにして得られた高精度 DEM データから地形陰影図（第 3 図右）等を作成し，微細な断層変位地形の分布の検出に用いた．

今回の計測地域には，笹が密生していてレーザーが地表面までほとんど到達していない箇所が存在していた．そこで，笹が密生する場所のうちで活断層トレースの延長部など地形判読上の重要な範囲については，笹の密生地を囲むようにポリゴンデータを作成し，オリジナルデータから作成した断面図を用いて笹の植生高を算出してポリゴン内の点群データの標高値を笹の植生高の分だけ下げるという処理を行なった．

以上の計測およびデータ処理は，国際航業株式会社によって実施された．

4. 断層変位地形の抽出

作成された地形陰影図をもとに，既存の活断層図に示されている活断層トレースの詳細位置を確認するとともに，その延長上などに微細な断層変位地形の有無について確認した．その結果，箱根峠東方，鞍掛山南方および田代盆地北方において，斜面上に形成された低崖や水系の屈曲等を確認した．これらの 3 地区における地形解析結果を以下に記述する．

4.1 箱根峠東方地区

箱根峠は箱根カルデラ外輪山上に位置する標高 830 m の峠である．この峠の東方に東西に走るほぼ平行した 2 条の低断層崖（活断層トレース a と b）が確認された（第 4 図）．

トレース a は北向きの斜面上に北上がりの低崖を形成しており，長さは約 1 km である．地形断面（a1-a1'，a2-a2'）から求めた上下変位量は約 4 m である（第 5 図）．この活断層トレースの東部では，複数の水系が右屈曲している．

トレース b は北向きの斜面上に北上がりの低崖を形成しており，長さは約 500 m である．地形断面から求めた上下変位量について，b1-b1' 断面では約 2 m，b2-b2' 断面では約 4 m である（第 5 図）．

4.2 鞍掛山南方地区

鞍掛山は，芦ノ湖の南約 1 km に位置する標高

1004 m の山で、箱根カルデラの外輪山の一部を構成している。この山の北側には、東西もしくは西北西－東南東走向の推定活断層が分布する（宮内ほか、2006；中田・今泉編、2002）。

今回作成した詳細 DEM の地形解析によって、鞍掛山の南方に、これまで示されている活断層の延長と思われる活断層トレース (c-j) が存在することを確認した（第 6 図、第 8 図）。

トレース c は東西方向に延びており、長さは約 600 m である。この活断層は、北向きの斜面上に北上がりの低断層崖を形成している。地形断面から求めた低断層崖の上下変位量について、c1-c1' 断面では約 7 m、c2-c2' 断面では約 6 m である（第 7 図）。このトレースの北西には、同様に東西に延びる活断層が存在しており、その延長が右ステップして連続している可能性が考えられる。

トレース d はトレース c の南側に平行して東西方向に延びており、長さは約 800 m である（第 6 図）。この活断層は、南向きの斜面上に北上がりの低断層崖を形成している。地形断面から求めた低断層崖の上下変位量は、トレース西部の d1-d1' 断面で約 7 m、トレース中央付近の d2-d2' 断面で約 2 m、トレース東部の d3-d3' 断面で約 3 m である（第 7 図）。

トレース e は北西－南東方向に延びており、長さは約 300 m である（第 8 図）。西へ流れる谷の両側の斜面上において、谷の左屈曲が認められる。トレース北部の e1-e1' 断面では、南向きの斜面上に比高 5 m の低断層崖が認められる（第 9 図）。また、谷の南側では e2-e2' 断面で約 2 m の西側隆起が認められる。このトレースがさらに南へ延長してトレース f に連続する可能性を検討したが、これらに間に断層変位地形が認められないため、ここでは別のトレースに区分して記載した。

トレース f は北北西－南南東走向に延びており、断層の長さは約 500 m である（第 8 図）。トレース全体を通じて、北上がりの低断層崖が認められる。この活断層による上下変位量は f1-f1' 断面で約 9 m、f2-f2' 断面で約 11 m、f3-f3' 断面で約 7 m である（第 9 図）。このトレースの南への延長は、南側に位置する推定活断層（八木ほか、1996；中田・今泉編、2002）に収斂すると推定される。

トレース g および h はともに、その南に位置する既知の活断層の北方延長にあたる南北もしくは北北西－南南東走向の活断層である（第 8 図）。いずれのトレースも北上がりの変位を伴っており、長さは東側のトレース g が約 450 m、西側のトレース h が約 400 m である。トレース g による上下変位量は g-g' 断面で約 12 m、トレース h による上下変位量は h1-h1' 断面で約 1 m、h2-h2' 断面で約 18 m である（第 10 図）。

トレース i および j は、平行する 2 条の北西－南東走向の活断層である。どちらも西側隆起のセンス

を持ち、断面 i-i' におけるトレース i の上下変位量は約 3 m、断面 j-j' におけるトレース j の上下変位量は約 1 m である（第 10 図）。

4.3 田代盆地北方地区

田代盆地は芦ノ湖の南方、約 5 km に位置する南北に延びる盆地で、その西縁に沿って丹那断層が走っている。活断層研究会編（1991）および八木ほか（1996）によると、1930 年北伊豆地震の際における地表地震断層は、田代盆地の北縁から芦ノ湖南東岸の箱根町断層までの間には示されていない。一方で、井原・石井（1932）は田代盆地北方の「まがの」および「こぶたの」における地表変位に関して報告しており、井原・石井（1933）の「北伊豆震災地質図」では田代盆地から約 1.5 km 北まで地表地震断層（原著では「新断層」と記述されている）が図示されている。

今回の地形解析では、この範囲に分布する既知の活断層の延長などに断層変位地形であると推定されるトレース k-n を見出した（第 11 図）。

トレース k は北西－南東方向に延びる南西上がりの崖地形で、北西側に分布する活断層の延長にあたる。今回新たに認めたトレース全体の長さは約 300 m である。上下変位量は、k1-k1' 断面で約 3 m、k2-k2' 断面で約 8 m、k3-k3' 断面で約 5 m、k4-k4' 断面で約 3 m である（第 12 図）。

トレース l は北北西－南南東方向に延びる西上がりの崖地形で、近接する活断層からの分岐断層とみられる。今回新たに認めたトレース全体の長さは約 400 m である。このトレースに沿った上下変位量は、l1-l1' 断面で約 6 m、l2-l2' 断面で約 2 m、l3-l3' 断面で約 6 m である（第 13 図）。

トレース m はほぼ南北に連なる西上がりの崖地形であり、南側に分布する西上がりの活断層の延長にあたる。上下変位量は、m1-m1' 断面で 8 m、m2-m2' 断面で約 15 m である（第 13 図）。なお、井原・石井（1933）の図には、この付近に地表地震断層が現れたことが示されている。

トレース n は右ステップして分布する 3 条の短い西上がりの崖地形であり、それぞれの走向は南北～北北西－南南東方向である。上下変位量は n1-n1' 断面で約 5 m、n2-n2' 断面で約 6 m である（第 13 図）。このトレースは、丹那断層の北端に現れた不連続な断層であると推定される。

5. 丹那断層北端部における断層分布形状

今回の詳細 DEM データを用いた地形解析により、これまでよりも活断層の連続性がよく分かるようになった。従来の研究においても示されている通り、対象地域に分布する活断層のうち、走向が南北性の活断層は左横ずれが、東西性の活断層は右横ずれが卓越する。

箱根峠東方地区および鞍掛山南方地区の北部では、東西走向の活断層が卓越する。これらの活断層では、横ずれよりも上下ずれの方が顕著であるが、上昇する側に統一性はみられない。これらに示される断層変位地形の形態的特徴及び分布位置がカルデラ外輪山周辺であることを考慮すると、東西走向の活断層は重力性の断層である可能性が高いと考えられる。

田代盆地北方地区では、北北西-南南東走向の活断層が右ステップしている分布形状が明確になった。左横ずれ断層である丹那断層の延長に右ステップ構造が存在することは、引張性の開口亀裂の形成と関係していると推察することができる。このことは、これらの活断層の東側に沿って湿地が存在すること、および1930年北伊豆地震の際に田代盆地北方で開口亀裂が生じたことと調和的である。

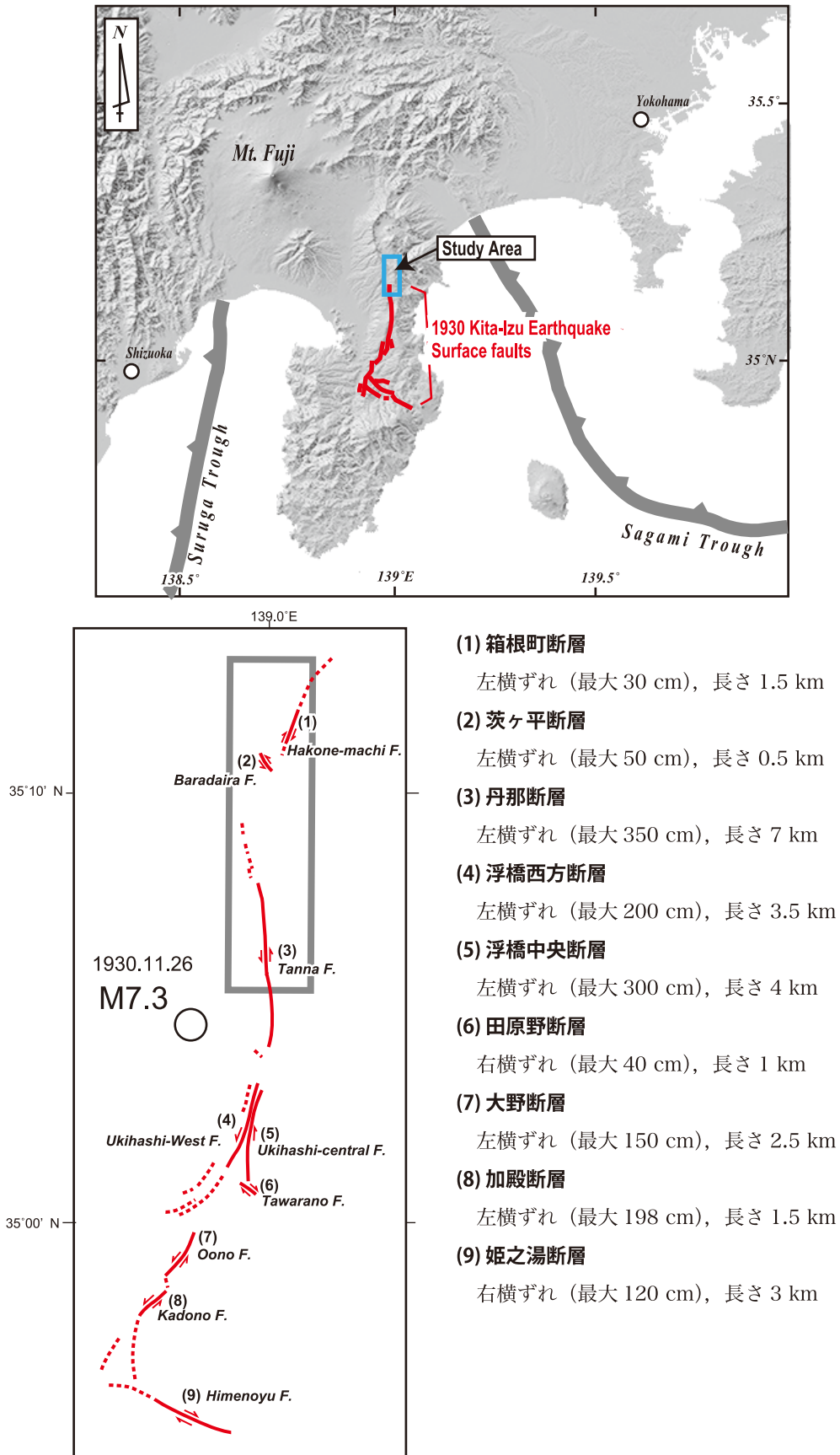
謝辞 浙江大学理学部の楊勛鳳氏には詳細DEMの地形解析に協力して頂いた。ここに御礼を申し上げます。本研究は、独立行政法人原子力安全基盤機構より受託した研究課題「平成21年度変動地形に基づく伏在断層評価手法の高度化」の一部を基に解析および検討を加えたものである。

文 献

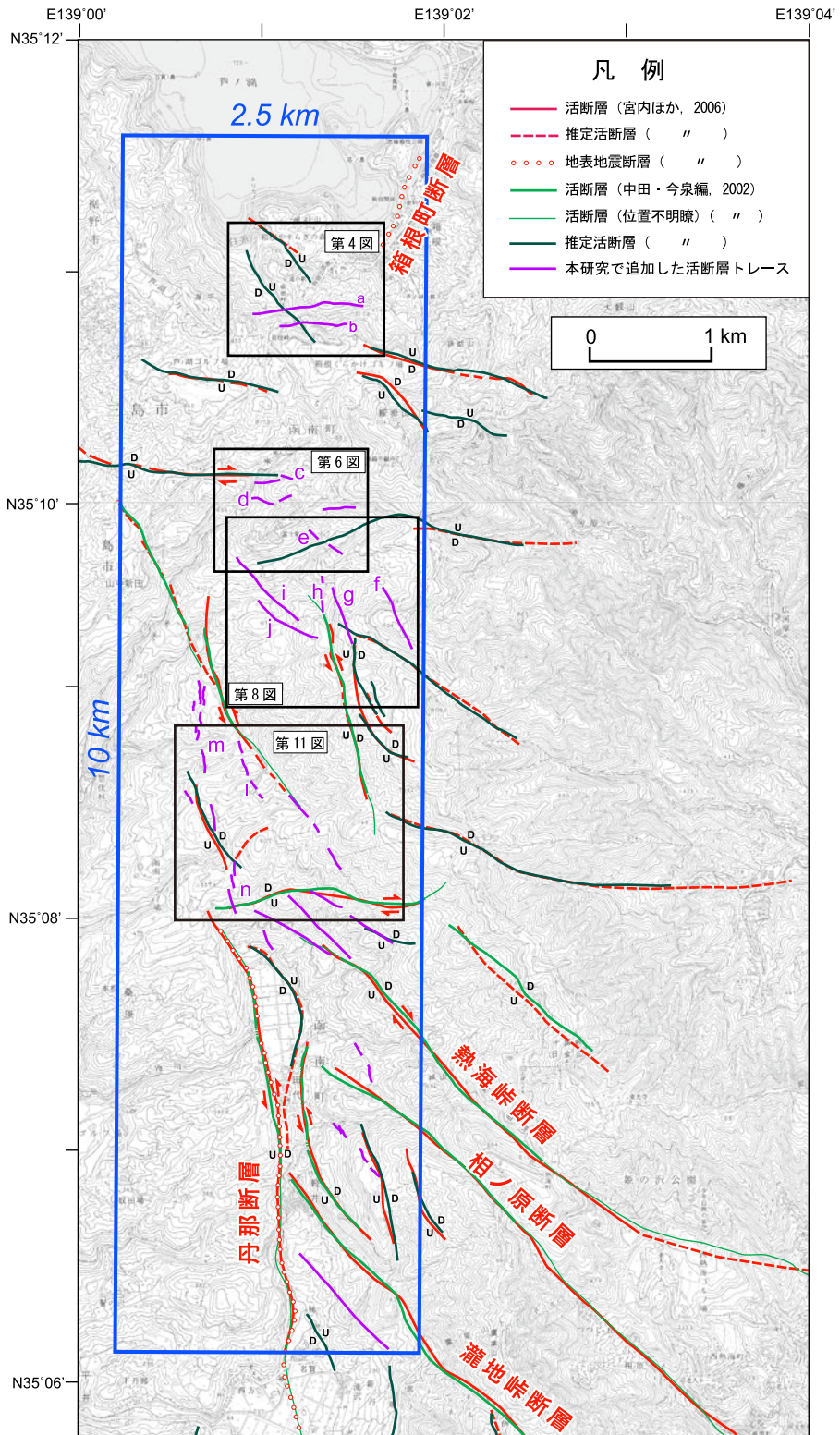
井原敬之助・石井清彦 (1932) : 北伊豆地震地域の地変 (其一). 地学雑誌, 43, 715-716.
井原敬之助・石井清彦 (1933) : 北伊豆地震地域の地変 (其二). 地学雑誌, 44, 77-83.

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.
久野 久 (1936) : 最近の地質時代に於ける丹那断層の運動に就いて. 地理学評論, 12, 19-32.
松田時彦 (1972) : 1930年北伊豆地震の地震断層. 星野通平・青木 斌編「伊豆半島」, 東海大学出版会, 73-93.
宮内崇裕・池田安隆・今泉俊文・佐藤比呂志・東郷正美 (2006) : 1:25,000都市圏活断層図「小田原」(第2版). 国土地理院技術資料, D.1-No.524.
中田 高・今泉俊文編 (2002) : 「活断層詳細デジタルマップ」. 東京大学出版会, DVD-ROM2枚, 付図1葉, 60p.
Otuka, Y. (1933) : The Geomorphology and Geology of Northern Idu Peninsula, the Earthquake Fissures of No. 26, 1930, and Pre- and Post- Seismic Crustal Deformations. Bull. Earthq. Res. Inst., 11, 530-574.
宇佐美龍夫 (2003) : 日本被害地震総覧 [416]-2001. 東京大学出版会, 605p.
Wesnousky, S. G. (2006) : Predicting the endpoints of earthquake ruptures. Nature, 444 (16), doi:10.1038/nature05275
八木浩司・今泉俊文・澤 祥・東郷正美・池田安隆 (1996) : 1 : 25,000 都市圏活断層図「熱海」. 国土地理院技術資料, D1-No.333.
吉岡敏和・栗田泰夫・下川浩一・杉山雄一・伏島祐一郎 (2005) : 「全国主要活断層活動確率地図」説明書. 構造図 No. 14, 産総研地質調査総合センター, 127p.

(受付: 2011年11月14日, 受理: 2011年12月2日)

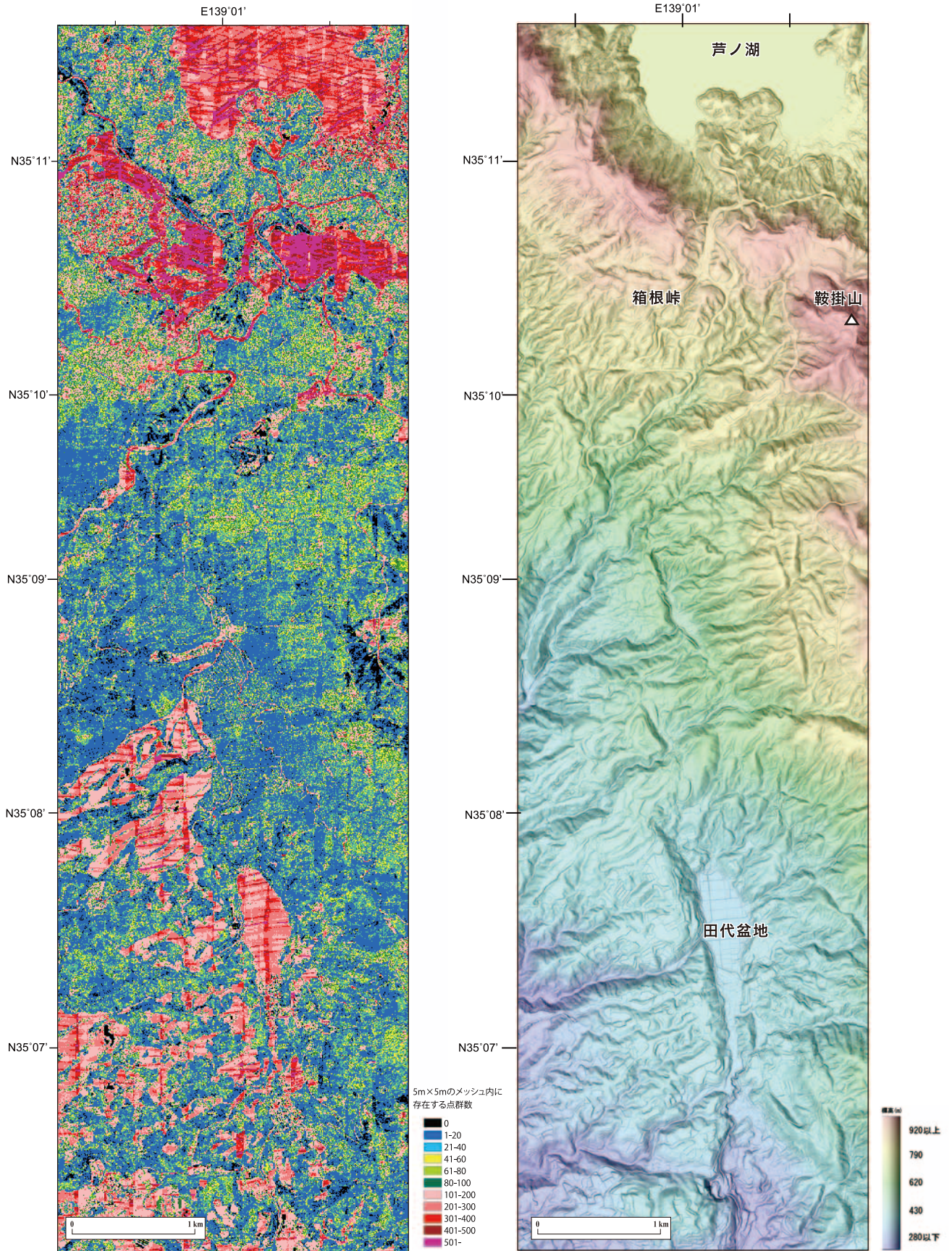


第 1 図. 調査対象地域の位置と 1930 年北伊豆地震に伴って出現した地表地震断層の概要. 各地表地震断層の名称, 変位量および断層長は松田 (1972) による. 震央の位置については宇佐美 (2003) を参照した.
Fig. 1. Map of a study area and the surface fault of the 1930 Kita-Izu Earthquake.



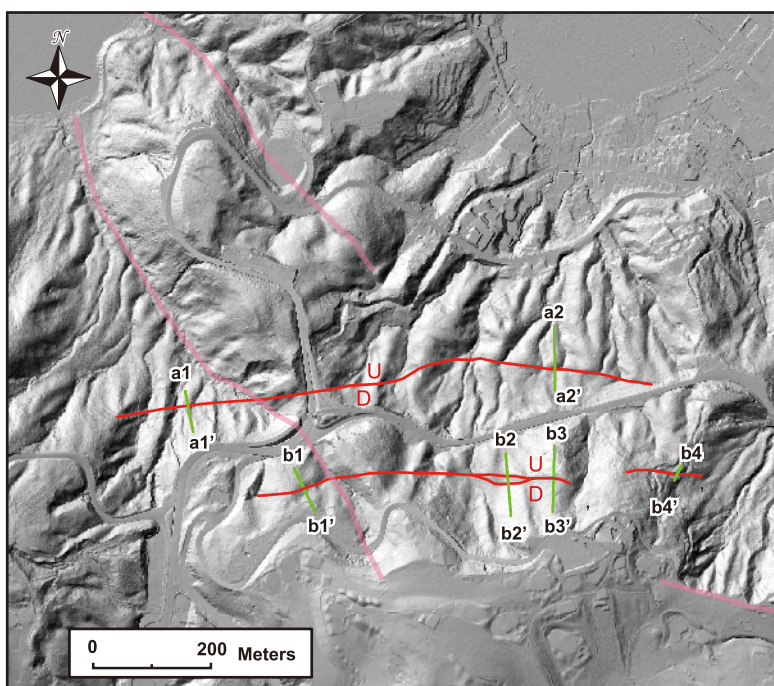
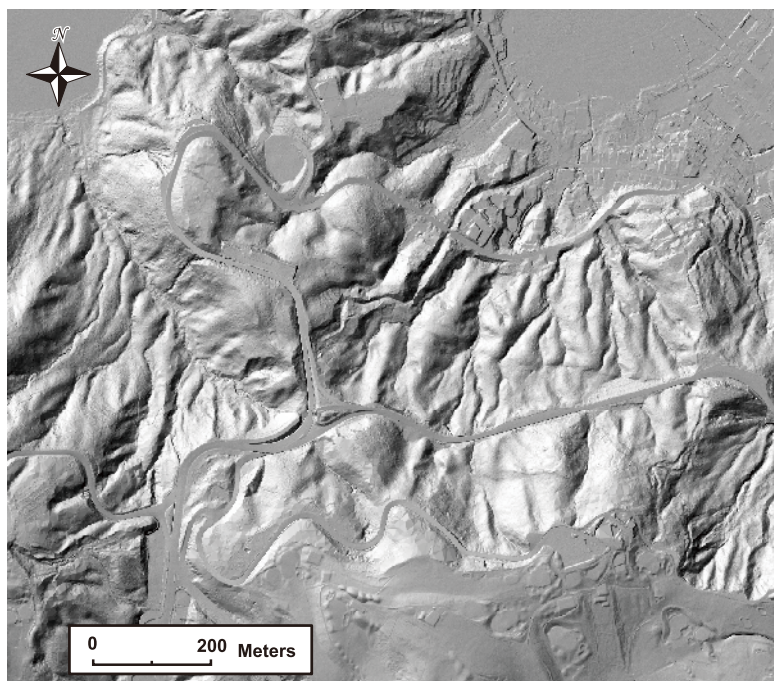
第2図. 丹那断層北端部における活断層の分布と航空レーザー測量実施範囲.
 基図には国土地理院発行の数値地図25000(地図画像)「横須賀」を使用.
 Fig. 2. Active fault map at the northern end of the Tanna fault. A blue line box is a measured area of the airborne LiDAR. Black line boxes show locations of the detailed maps of Figs. 4, 6, 8 and 11.

丹那断層北端部における断層変位地形の分布形状



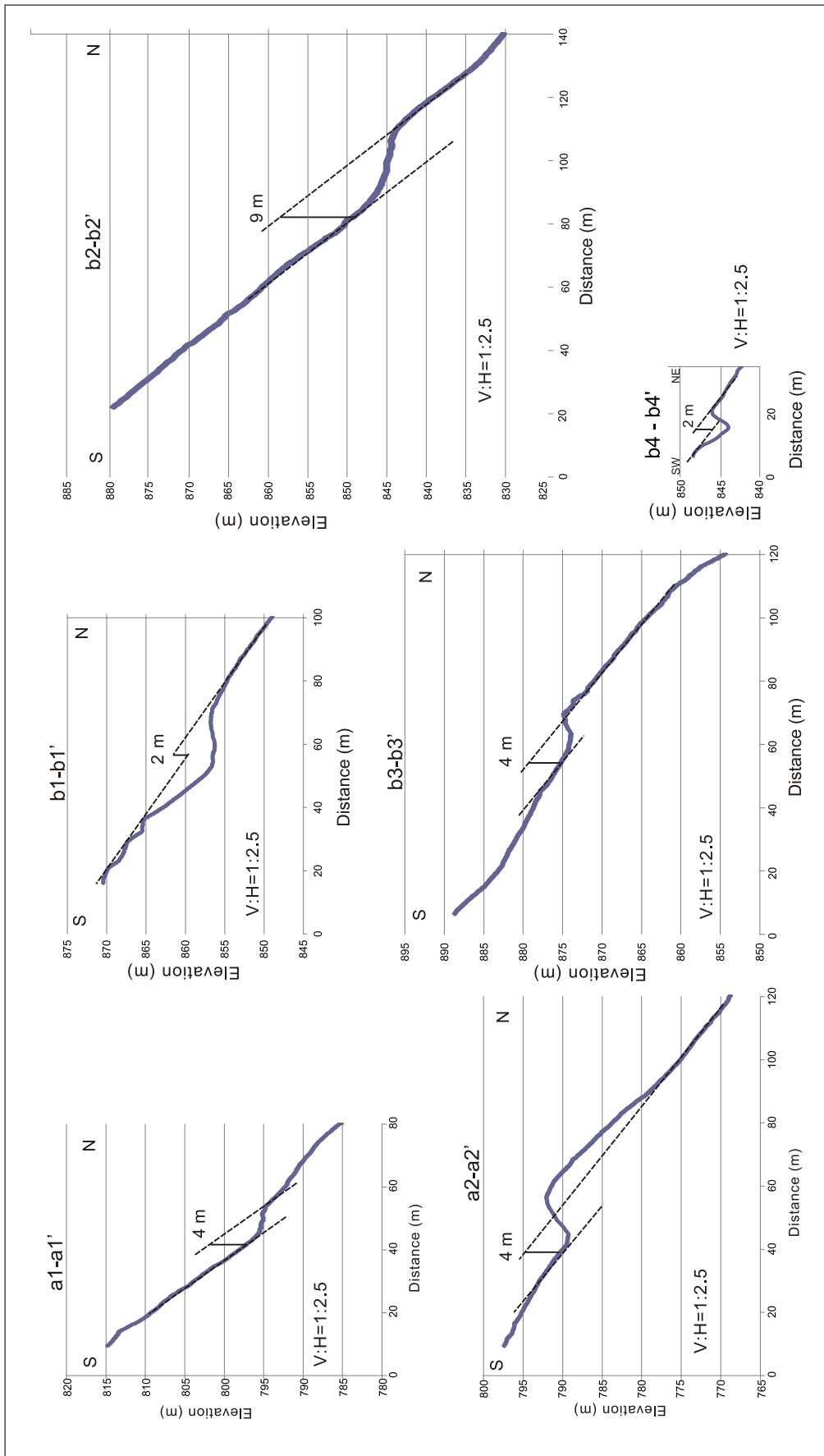
第3図. 航空レーザー測量におけるグラウンドデータ取得密度分布図(左)と0.5 mDEMで作成した対象地域のカラー陰影図(右).

Fig. 3. Distribution map of the density of the ground data of airborne LiDAR (left) and a shade map with 0.5 m DEM (right).

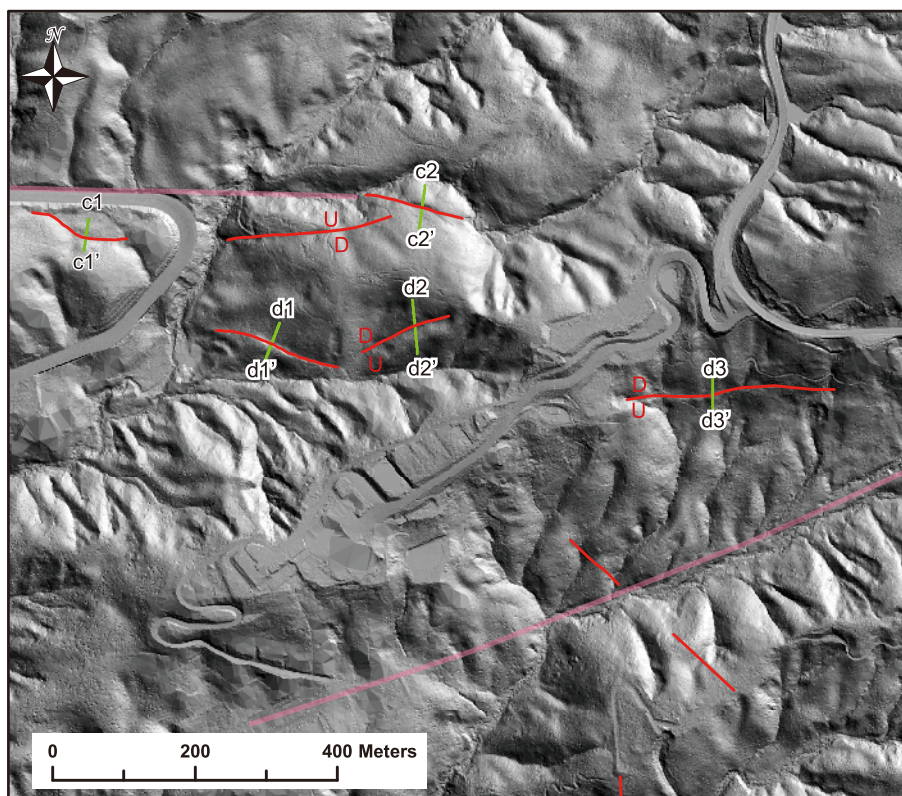
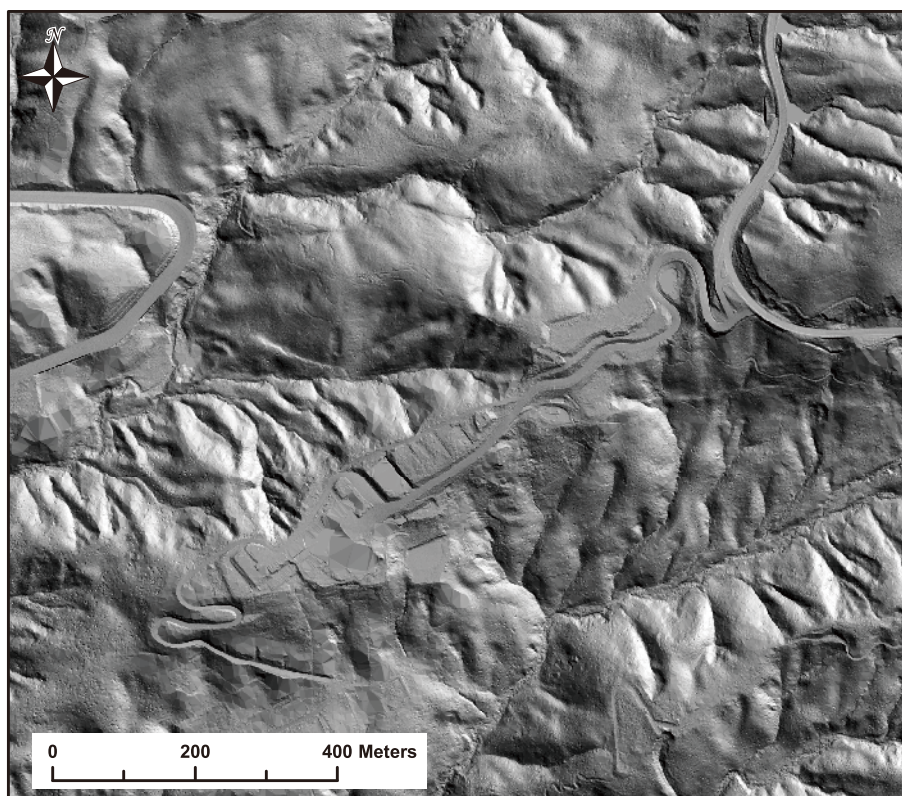


第 4 図．箱根峠東方地区の地形陰影図と活断層の分布．活断層トレース a, b の地形断面図を第 5 図に示す．地形陰影図の光源は北西とした．緑色の線は断面測線，薄いピンク色の線は既存の資料に示されている活断層の位置をそれぞれ示す．

Fig. 4. Detailed fault traces on the shade map with 0.5 m DEM in the area on the east of the Hakone Pass.

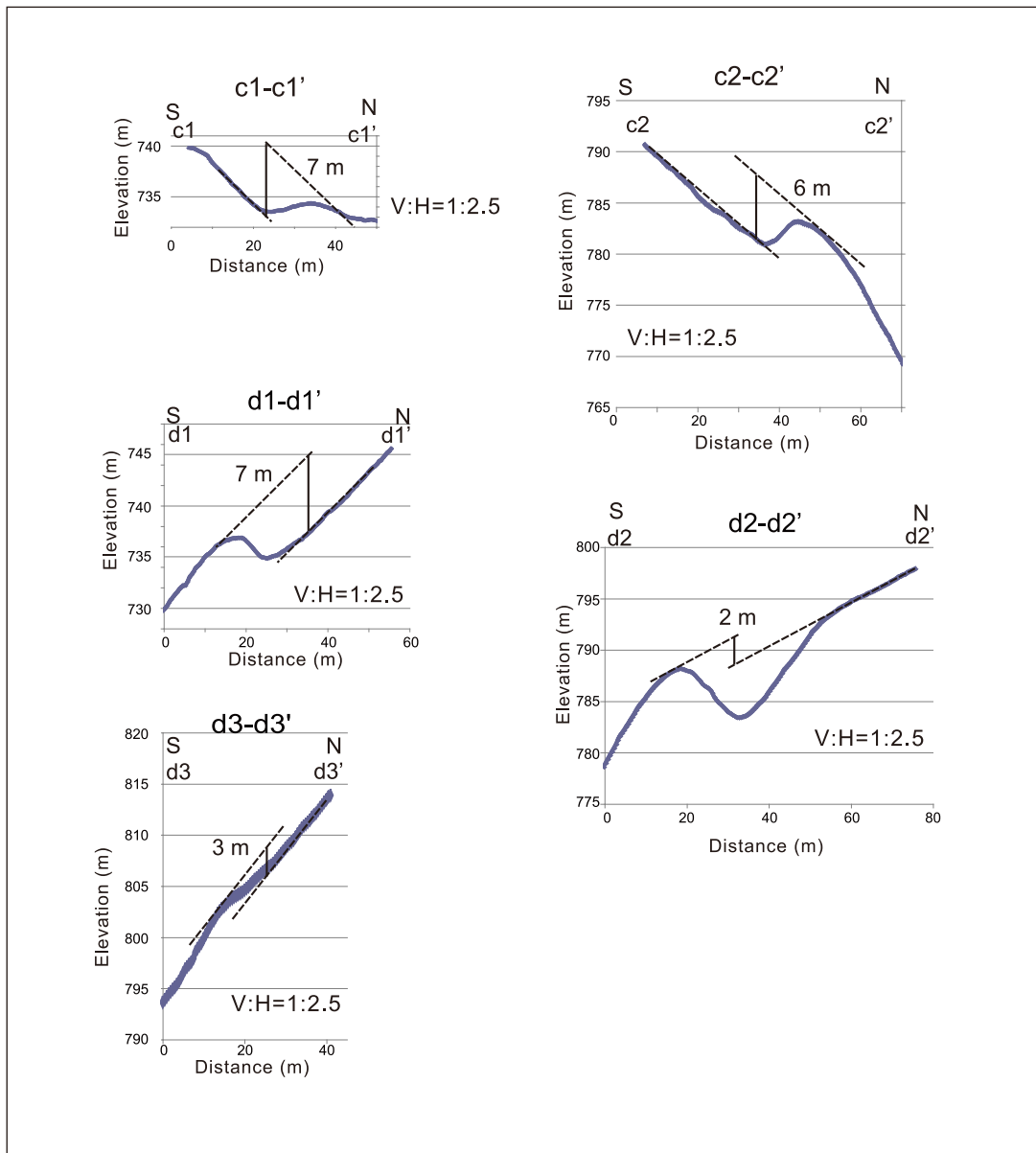


第5図. 詳細DEMにより作成した活断層トレース a および b の地形断面図. 各断面の位置は第4図に示す.
 Fig. 5. Topographic profiles of fault trace a and b in the area on the east of the Hakone Pass.

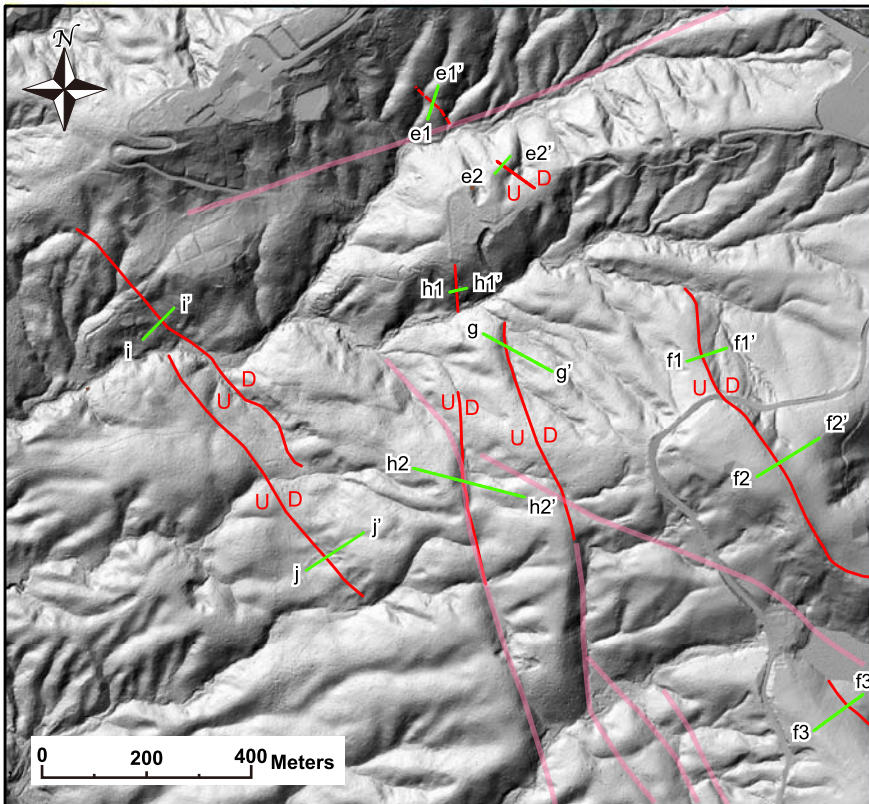
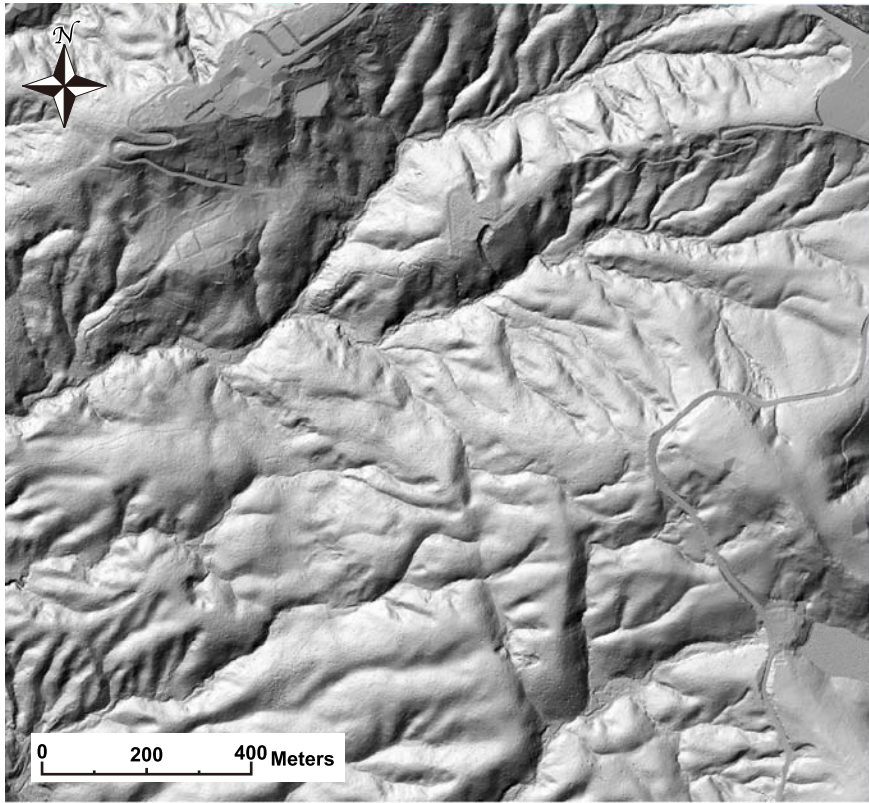


第 6 図. 鞍掛山南方地区の地形陰影図と活断層の分布 (1). 活断層トレース c および d の地形断面図を第 7 図に示す. 緑色の線は断面測線, 薄いピンク色の線は既存の資料に示されている活断層の位置を示す.

Fig. 6. Detailed fault traces on the shade map with 0.5 m DEM in the area on the south of the Mt. Kurakake.

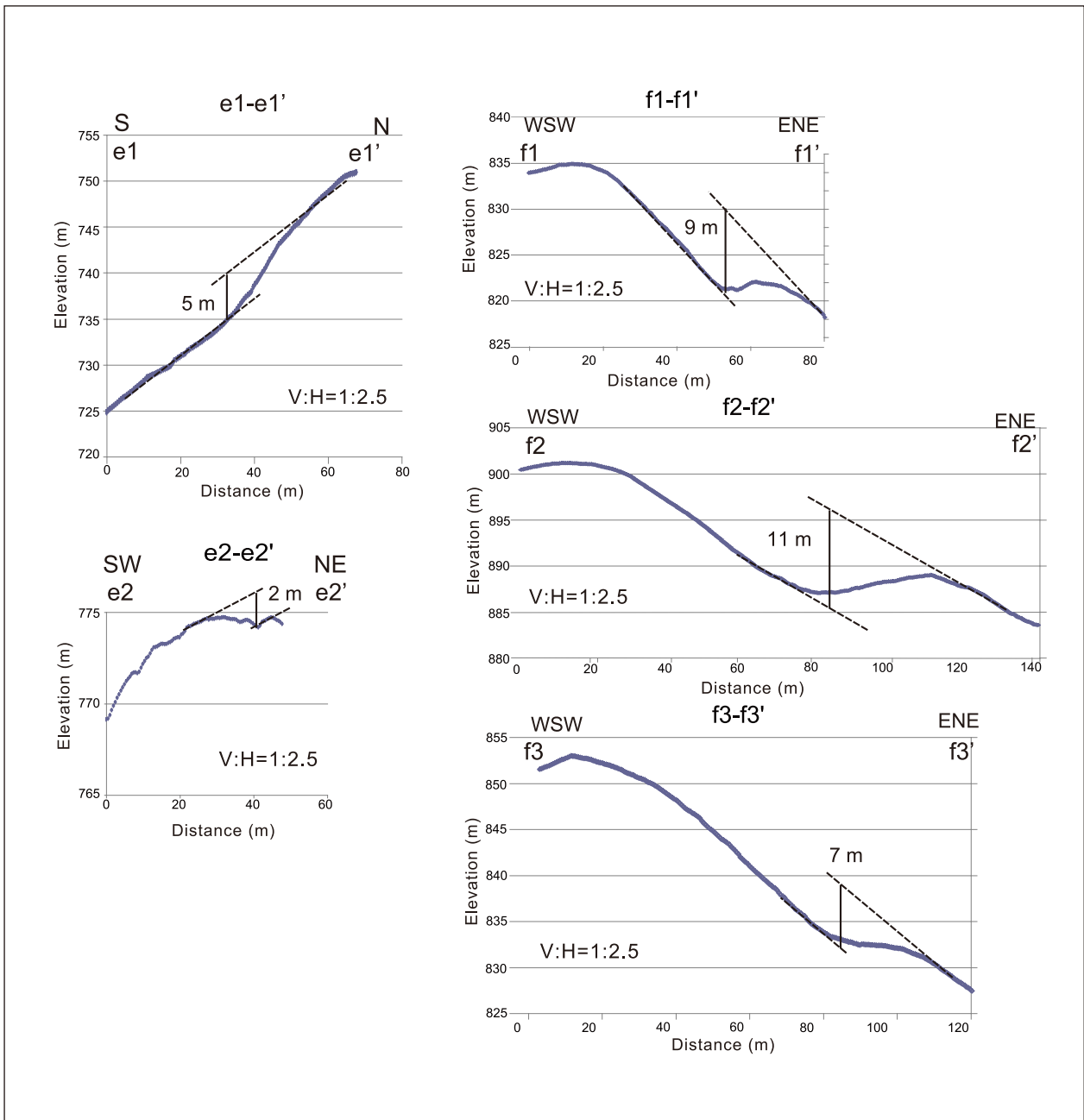


第7図. 詳細DEMにより作成した活断層トレースcおよびdの地形断面図. 各断面の位置は第6図に示す.
 Fig. 7. Topographic profiles of fault traces c and d in the area on the north of the Mt. Kurakake.

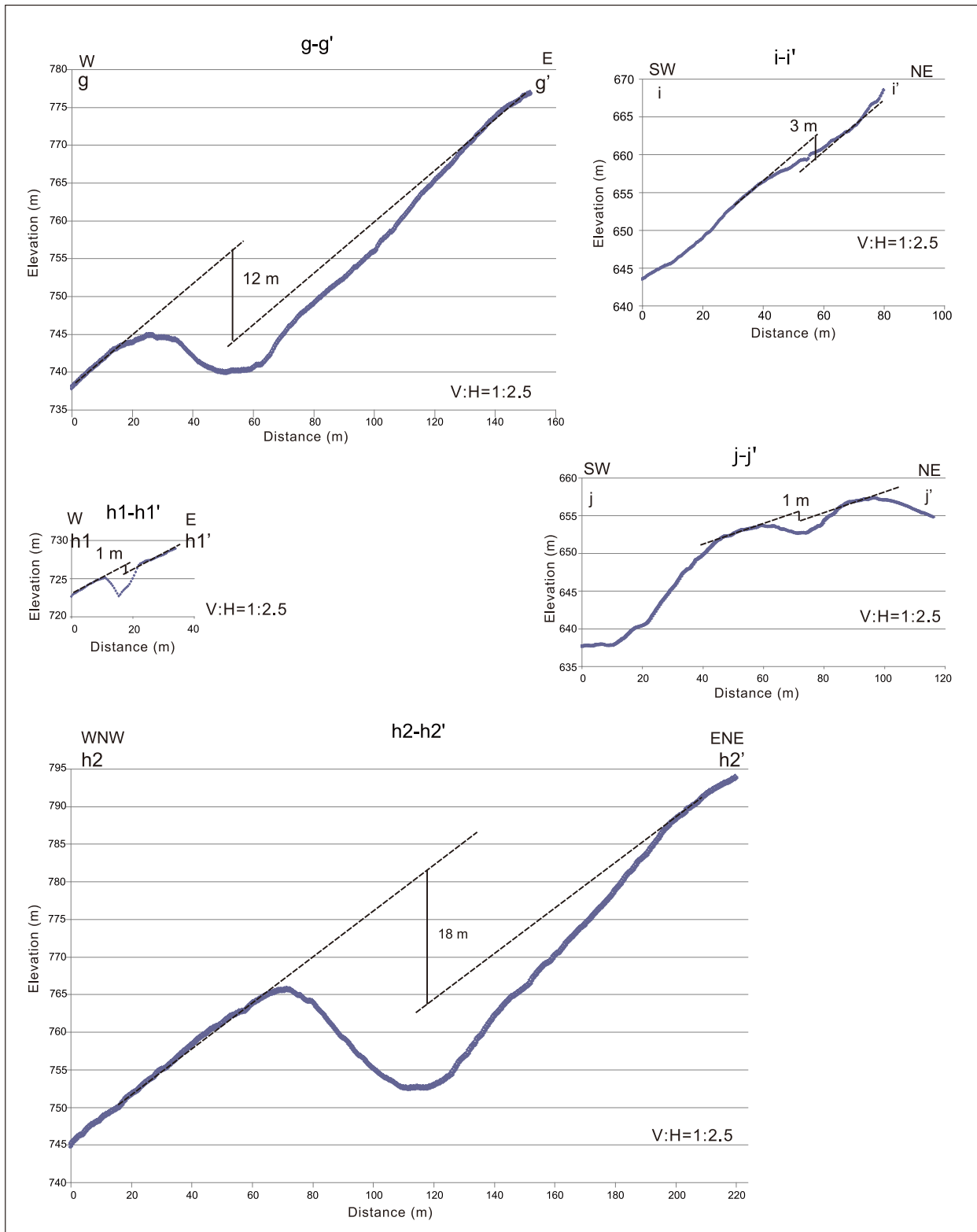


第 8 図. 鞍掛山南方地区の地形陰影図と活断層の分布 (2). 活断層トレース e, f の地形断面図を第 9 図に, 活断層トレース g, h, i および j の地形断面図を第 10 図に示す. 緑色の線は断面測線, 薄いピンク色の線は既存の資料に示されている活断層の位置を示す.

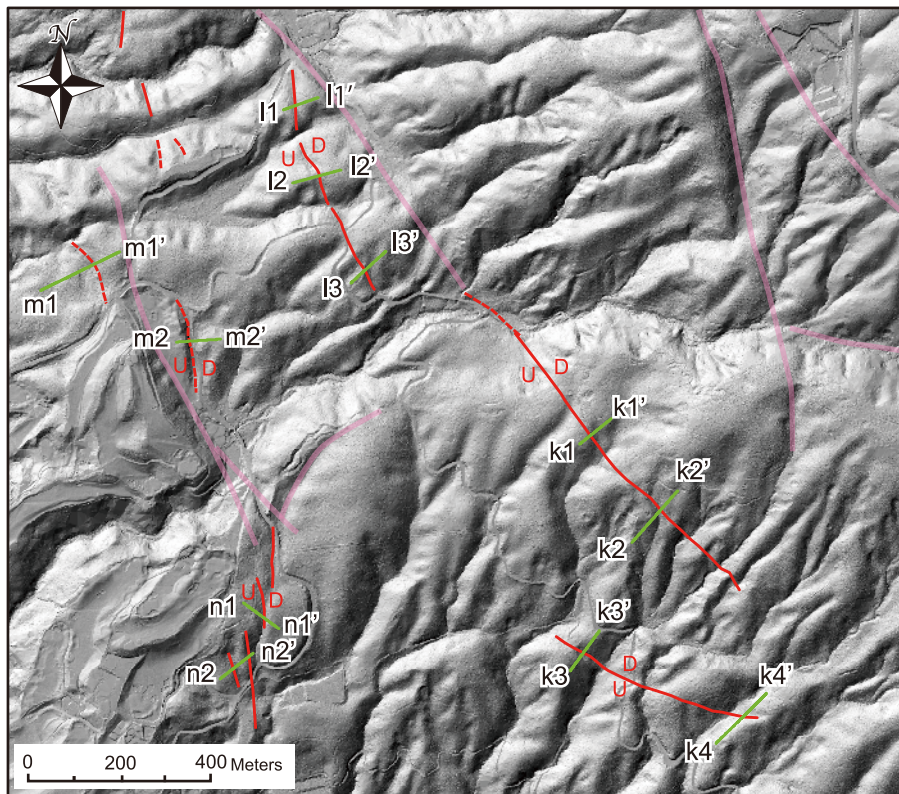
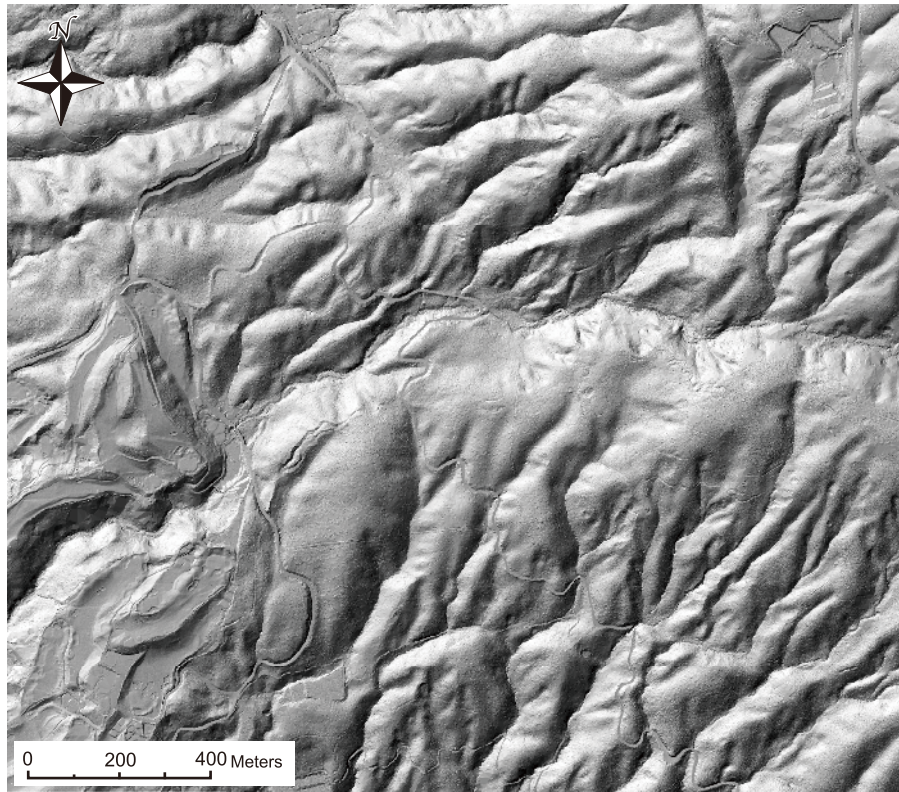
Fig. 8. Detailed fault traces on the shade map with 0.5 m DEM in the area on the south of the Mt. Kurakake (2).



第9図. 詳細DEMにより作成した活断層トレースeおよびfの地形断面図. 各断面の位置は第8図に示す.
 Fig. 9. Topographic profiles of fault traces e and f in the area on the north of the Mt. Kurakake.

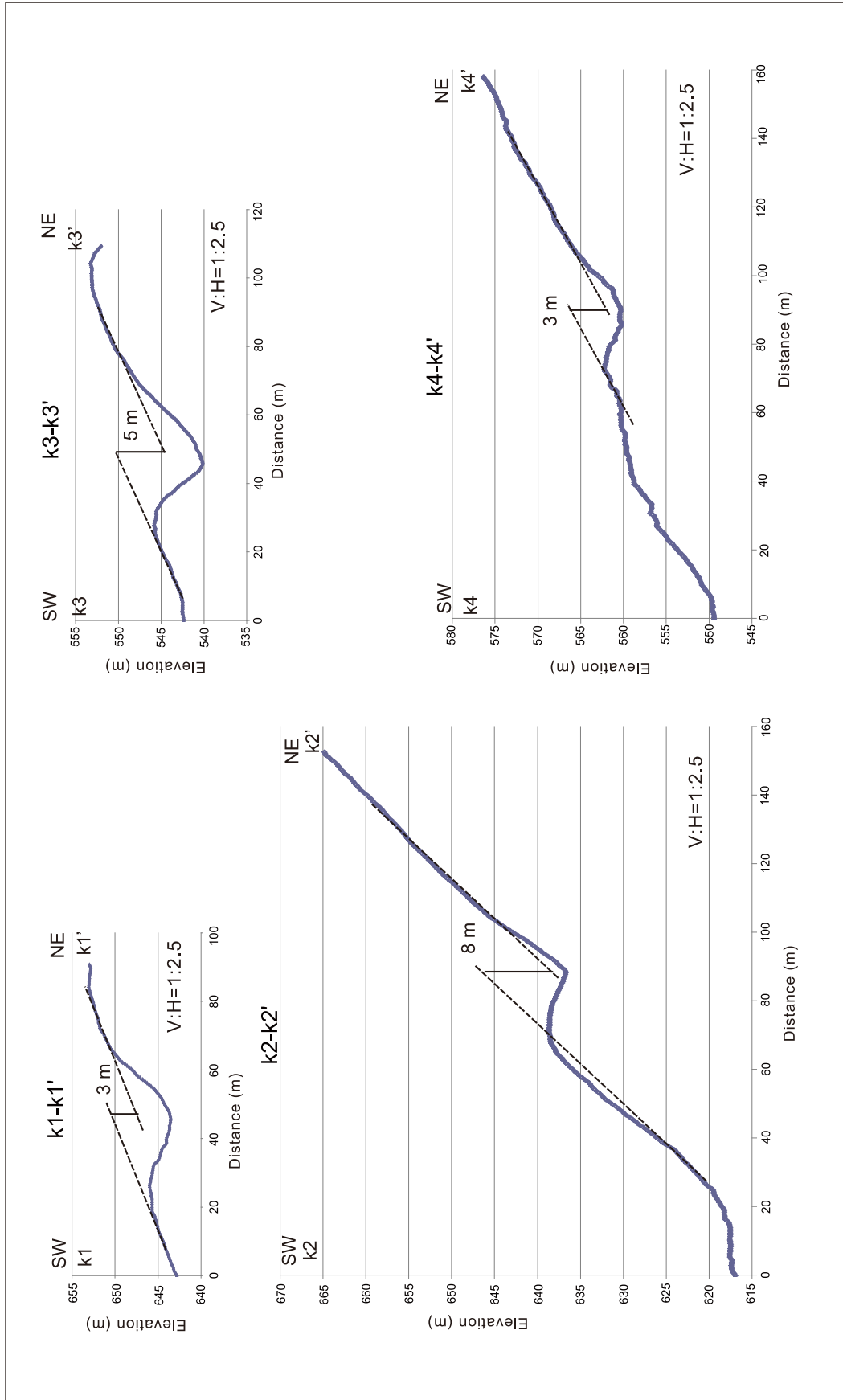


第10図. 詳細DEMにより作成した活断層トレース g, h, i および j の地形断面図. 各断面の位置は第8図に示す.
 Fig. 10. Topographic profiles of fault traces g and h in the area north to the Mt. Kurakake.

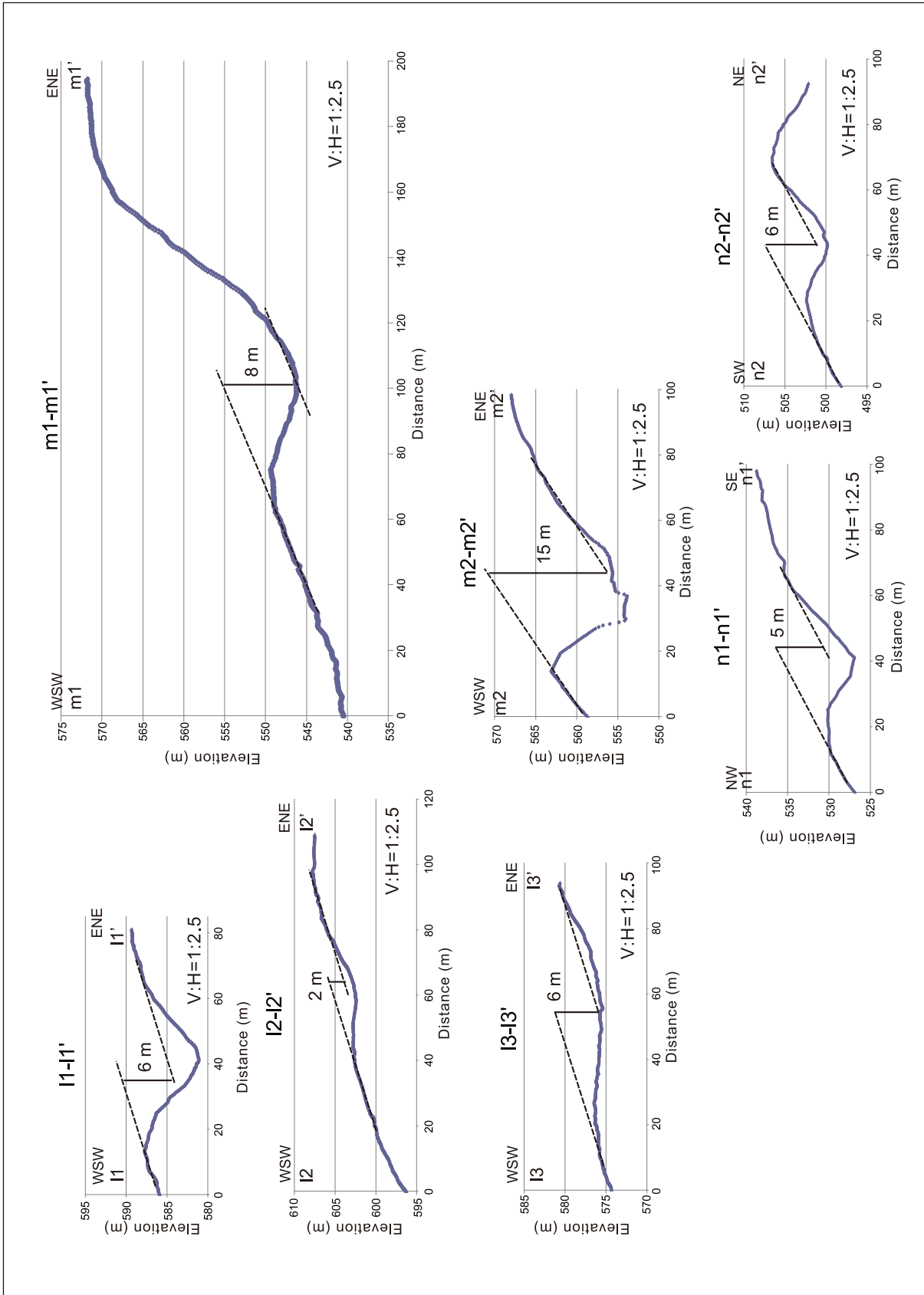


第 11 図. 田代盆地北方地区の地形陰影図と活断層の分布. 活断層トレース k の地形断面図を第 12 図に, 活断層トレース l, m および n の地形断面図を第 13 図にそれぞれ示す. 地形陰影図の光源位置は北西とした. 緑色の線は断面測線, 薄いピンク色の線は既存の資料に示されている活断層の位置を示す.

Fig. 11. Detailed fault traces on the shade map with 0.5 m DEM in the area on the north of the Tashiro Basin.



第12図, 詳細DEMにより作成した活断層トレースkの地形断面図, 各断面の位置は第11図に示す.
 Fig. 12. Topographic profiles of fault trace k in the area on the north of the Tashiro Basin.



第13図. 詳細DEMにより作成した活断層トレース1, mおよびnの地形断面図. 各断面の位置は第11図に示す.
Fig. 13. Topographic profiles of fault traces m and n in the area on the north of the Tashiro Basin.