

論文

花崗岩急斜面に発達するシーティング節理群の形態と卓越方向
—広島市八幡川地域および呉市東能美島地域を例として—

濱沖 俊史*・横田修一郎**・崎村 信行***

Sheeting joints and their dominant trends on steep slopes of granitic rocks
in the Yahata River and Higashi-noumi-Jima areas, Hiroshima, Japan

Toshifumi Hamaoki*, Shuichiro Yokota** and Nobuyuki Sakimura***

Abstract

Dips and strikes of sheeting joints developed in steep valleys of granite in Hiroshima, were measured to understand the geometrical relationship between sheeting joints and slopes. The results show low angle sheeting joints tend to have the same direction as the slopes. Dip angle is gentler (10 to 20 degrees) than those of the slopes. The strike of the sheeting joints is also roughly concordant with those of the slope shape.

Considering that no heterogeneous texture exists in the granite, the correspondence mentioned above suggests that these features formed under the influences of the shape of the steep slopes and their formation process. Shear stress due to unsymmetrical pressure within slopes or seismic vibration may form such sheeting joints.

Key words: sheeting joint, slope failure, steep slope, granite, Hiroshima

はじめに

花崗岩地域の斜面崩壊はシーティング節理に依存して発生することが多く、このため、節理面の方向や形態は斜面安定性を支配する基本要素の1つとなる(橋川, 1985; 瀬尾ほか, 1995; 千木良, 2000 など)。シーティング節理は一般に緩傾斜をなす山稜や山腹斜面にほぼ平行した節理であり、その形態・分布から、山地の浸食・削剝に伴う上載荷重の減少に起因し、引張応力による破壊面と考えられてきた(Bradley, 1963; Price, 1966; Billings, 1972 など)。

花崗岩類が広く露出する中国山地ではシーティング節理の発達が目立ち、とりわけ広島市とその周辺地域では、ダムサイト斜面の安定性や斜面崩壊の発生原因に関連して、節理系の調査・研究が古くからなされてきた(橋川・宮原, 1974; 橋川, 1978, 1985; 瀬尾, 1991; 千木良, 2000 など)。

当地域のシーティング節理は緩斜面を深く開析した谷壁斜面に現れやすく、節理面は河谷の両岸から谷側に傾斜する傾向にある(橋川・宮原, 1974; 橋川, 1978, 1985)。この場合、谷壁斜面と同方向に傾斜するシーティング節理面は流れ

盤をなすことから、斜面崩壊発生の地質的素因となりやすい。1999年広島豪雨災害時の斜面崩壊でもその大半はそのようなタイプと考えられた(横田ほか, 1999; 千木良, 2000; Chigira, 2001)。また、同年に山口市鳴滝地区にて発生したトッピング(幅約40m, 高さ約35m)もシーティング節理面とそれに直交する節理面が原因と考えられた(西川ほか, 2001)。

このように、花崗岩地域のシーティング節理面は斜面崩壊等の発生に関与することが多いが、その形態や方向に関しては河谷横断面上での概念的な把握に留まっており、凹凸をもった谷壁斜面との形態上の正確な関係はいまだ明らかではない。そこで、筆者らは急斜面に現れるこうしたシーティング節理の形態を斜面との関係で正確にとらえることを試みた。具体的には、1999年広島豪雨災害にて甚大な被害のあった広島市西部の八幡川沿いと呉市東能美島の2地域(第1図)を対象に、シーティング節理面の形態と方向の空間的变化を調べた。

中国山地の花崗岩河谷に発達するシーティング節理

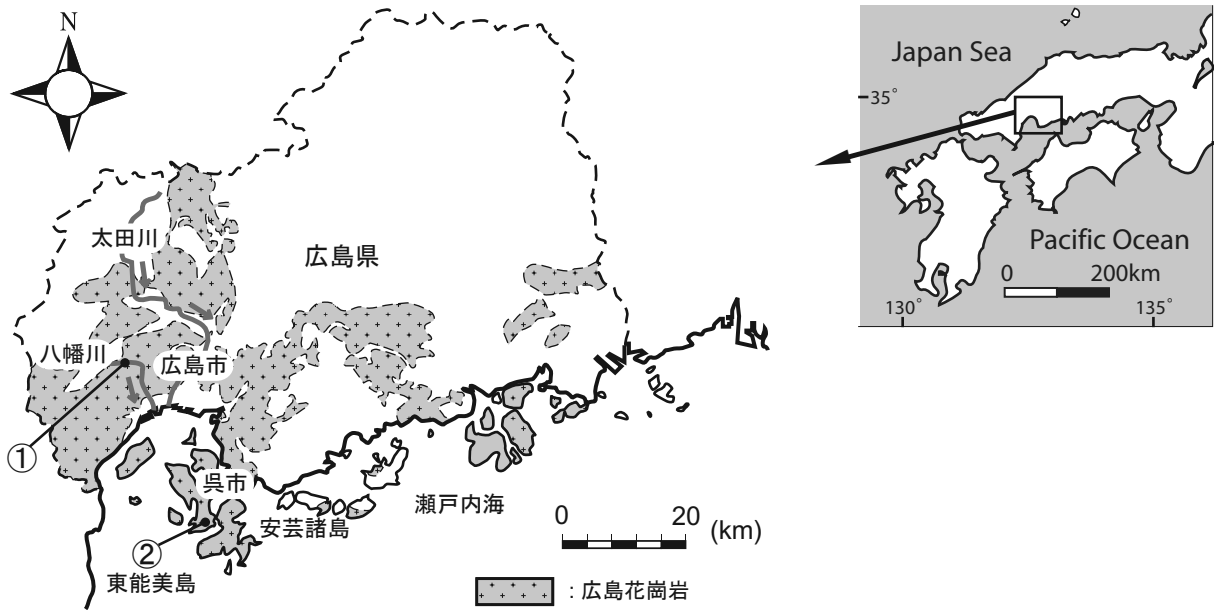
広島地域を中心としたこれまでの研究結果(橋川, 1978; 千木良, 2000 など)に基づけば、河谷横断面上のシーティング節理面は概念的には第2図(a), (b)のように考えられている。

橋川(1978, 1985)は、緩傾斜面を深く開析した谷壁斜面ではシーティング節理は谷壁斜面と同方向に傾斜し、斜面より15°前後緩傾斜に現れることを指摘した(第2図(a))。さらに、特定方向の節理面が発達した結果、斜面構成岩盤は力

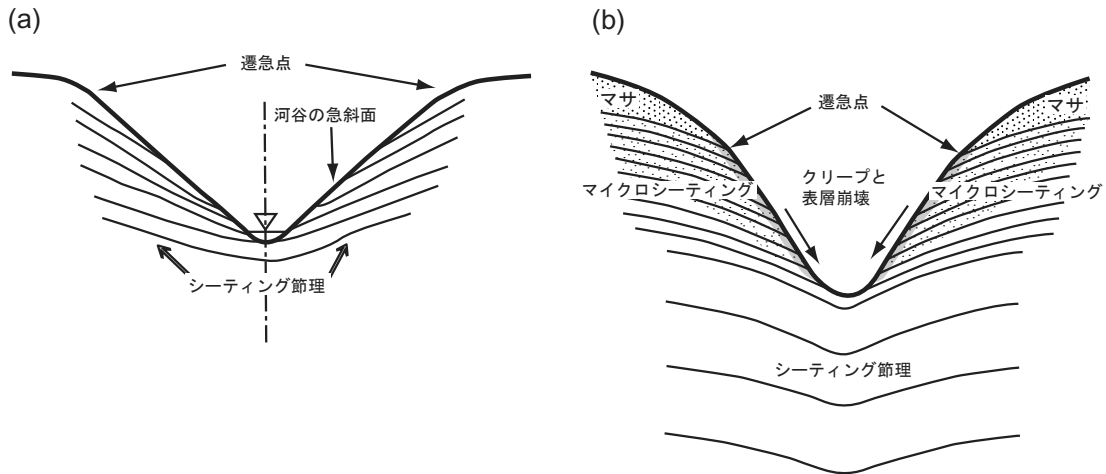
* 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学専攻
Department of Geoscience, Shimane University, 1060 Nishikawatsu,
Matsue City, 690-8504, Japan

** 島根大学総合理工学部地球資源環境学教室
Department of Geoscience, Shimane University, 1060 Nishikawatsu,
Matsue City, 690-8504, Japan

*** 島根大学総合理工学部地球資源環境学科(現在:広島県西警察署)
Present address: Hiroshima Prefectural Police, 4-1-3 Nishi-ku,
Hiroshima City, 733-0833, Japan



第1図 広島花崗岩体の分布と対象地域の位置. ①八幡川地域, ②東能美島地域.



第2図 広島地域の花崗岩谷壁斜面におけるシーティング節理の概念図. (a) 橋川 (1978, 1985), (b) 千木良 (2000).

学的異方性を有することを弾性波速度の差異から説明した (橋川, 1985).

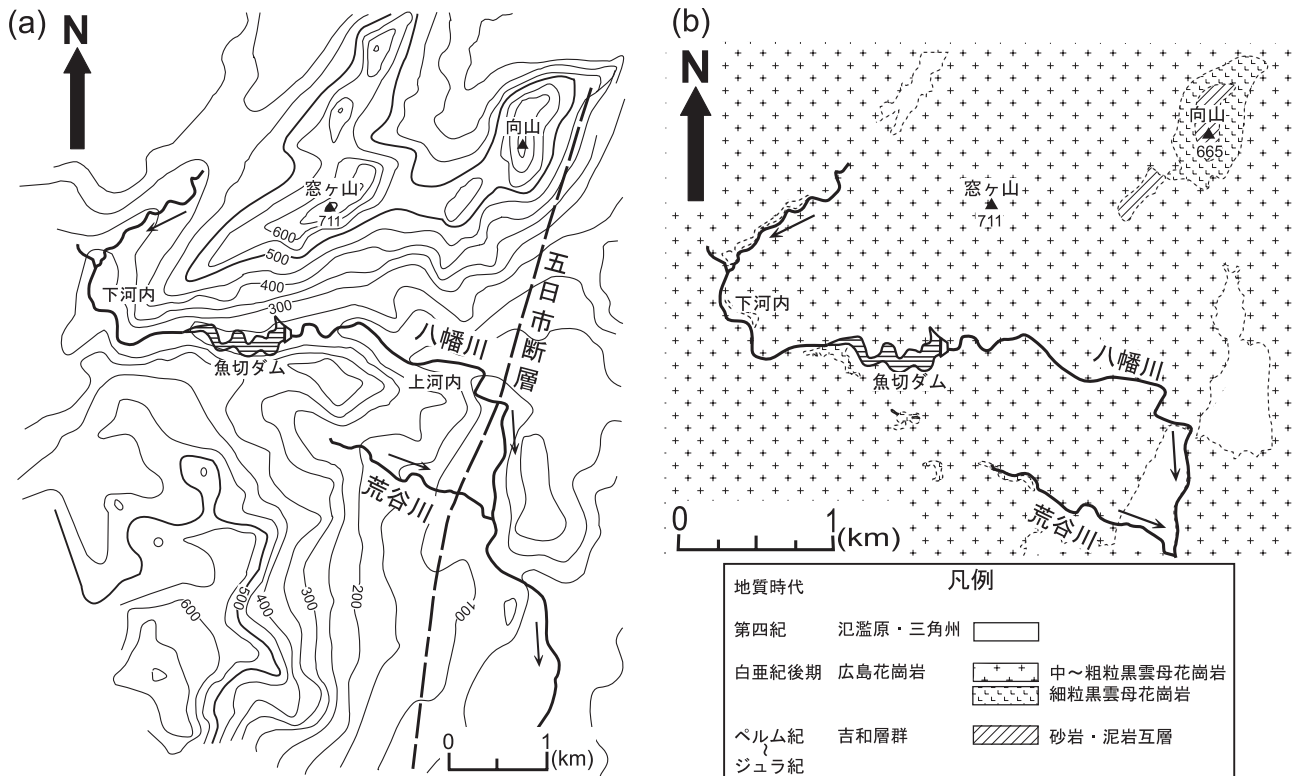
一方, 千木良 (2000) は, 広島豪雨災害直後に八幡川支流の荒谷川沿いを調査し, シーティング節理面は谷壁斜面や大半の山腹斜面ではそれらよりわずかに低角になるが, 平坦~緩斜面な稜線をもった尾根部ではそれに平行になるとした (第2図 (b)). さらに, 平面図上で個々のシーティング節理面の走向を結んだトレンドは河谷の概形に調和的であることを示した (千木良, 2000).

谷壁斜面に調和した節理面は中国山地の他地域でも知られているが (加古・横田, 2002; 崎村, 2004 など), シーティング節理の出現は比高の大きな河谷に限られる傾向がある. 加古・横田 (2002) は, 鳥取県日野川上流域では比高の大きな河谷にはそれに調和したシーティング節理が現れるが, 小

さな河谷には現れないことを指摘した.

節理面の間隔に関しては, 一般に地表に近い部分ほど狭くなる傾向が知られている (Ollier, 1969). 瀬尾ほか (1995) は多数のボーリング・コアの観察から, シーティング節理が地下 70 m 付近まで確認できるが, 密集部は地下 20~30 m に限定されることを指摘した. さらに, 藤田・横山 (2006) は, 延長 750 m のボーリング・コアを用いて, シーティング節理面の間隔は深度とともに段階的に広がることを示した.

シーティング節理と同方向をなす微小クラック “lamination” の存在は, 橋川 (1985) によって指摘され, 千木良 (2000) はこれをマイクロシーティング, また藤田 (2002) はラミネーション・シーティングとよんでいる. 藤田 (2002) は, 花崗岩山地における風化帯とラミネーション・シーティングの関係から, 後者はマサ状風化部でよく発達し, 地表か



第3図 八幡川地域の地形概要 (a) と地質概要 (b).

ら深度 30~40 m に限定されていることを示した。その結果、化学的風化に先行するラミネーション・シーティングの出現が“風化帯”形成に重要な役割をなすことを示した (藤田, 2002)。

このように、シーティング節理の形成はラミネーション・シーティングも含めて漠然とながらも深い河谷の形成や風化の進行にかかわっていると考えられてきた。しかし、その形態や方向の把握は河谷横断面上や地表から深部方向への変化傾向のみであり、凹凸をもった谷壁斜面との3次元的な形態関係やそれらを基にした形成機構は明らかになっていなかった。

対象地域の地形・地質概要と急斜面

1. 対象地域の地形・地質概要

今回、節理面方向の測定を2地域の急斜面にて計画したが、一般に斜面上でのシーティング節理の形成には、風化過程も含めた地形・地質発達史が大きく関与するであろうから、以下では両地域 (第1図の①, ②) の地形・地質概要について述べる。

対象地域のうち、八幡川地域はなだらかな中国山地を深く開析する河谷の谷壁斜面が主体であり、一方、東能美島地域は安芸諸島をなす島嶼の海岸沿い急斜面である。両地域とも斜面は中～粗粒黒雲母花崗岩よりなり、広島花崗岩類と総称されている (山田ほか, 1986)。それぞれの地域では広島花崗岩類、呉花崗岩類とよばれることもあり、黒雲母 K-Ar 法による年代測定では、前者は約 90 Ma (山田ほか, 1986)、

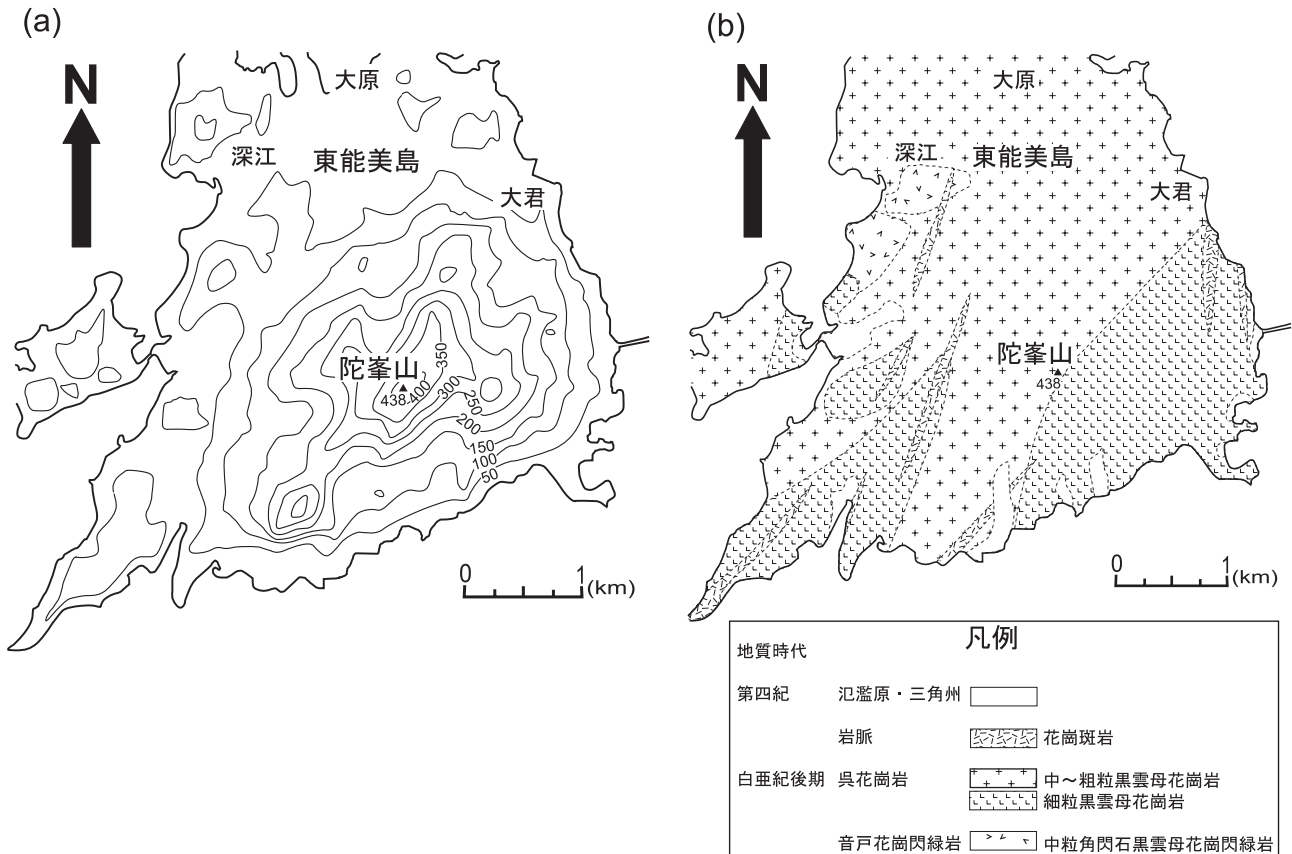
後者は約 79~86 Ma が得られている (東元ほか, 1985)

八幡川地域の地形・地質概要を第3図 (a), (b) に示す。八幡川は中国山地から瀬戸内海に向かって南流するが、NNE-SSW に延びる五日市断層 (活断層研究会編, 1991) の西側山地では深い峡谷をなしており、峡谷区間は先行谷 (antecedent valley) として形成されたと考えられる。まわりの山地は標高 500~600 m に浸食小起伏面を有し、向山 (標高 665 m) や窓ヶ山 (標高 711 m) 等の山稜がこの面から残丘状に突出している。八幡川のすぐ南側には支流の荒谷川がこれと並行して浅い峡谷を形成している。急斜面をなす谷壁斜面の比高は八幡川本流では最大約 150 m に達し、その最深部に魚切ダムが設置されている。荒谷川の両岸も急斜面であるが、比高は約 50 m と八幡川より低い。

五日市断層は、それを境とした更新統の分布標高の違いから、延長約 20 km の活断層とされているものであり、したがって、八幡川の下刻作用による深い峡谷の形成は断層活動に伴う西側山地の隆起ともかかわったものと考えられる。

第3図 (b) に示すように、この地域は中～粗粒の黒雲母花崗岩が主体である。細粒黒雲母花崗岩は北部の向山周辺にまとまって分布するほか、花崗岩中に岩脈状に産する。向山付近の細粒黒雲母花崗岩は優白色を呈し、局所的に小規模なベグマタイトを伴っている。花崗岩中にはさらに花崗斑岩、石英閃緑斑岩、アプライトなどが岩脈として貫入しており、魚切ダム右岸では NNW-SSE 方向のアプライト脈、N-S および NE-SW 方向の花崗斑岩脈、N-S 方向の石英閃緑斑岩脈を確認した (濱沖, 2006)。

向山等の残丘地形部にはペルム紀～ジュラ紀の砂岩・泥岩



第4図 東能美島地域の地形概要 (a) と地質概要 (b)。

互層がルーフペンダントとして断片的に残存している。この直下の花崗岩中には粘土細脈が発達しており、花崗岩体の冷却固化過程で形成されたと考えられている (Kitagawa, 1999)。

八幡川沿い谷壁斜面の大半は道路法面の人工的な掘削岩盤であり、全般に新鮮な箇所が多い。これ以外の自然露頭には多少風化した箇所も見られる。荒谷川沿いには全般に風化した箇所が多く、林道法面でもマサ状風化部が広く見られる。マサ状部と新鮮な部分のコントラストは明瞭なこともあり、これは節理面に沿った岩盤の緩みが風化に影響したためと推定される。

次に、東能美島地域の地形・地質概要を第4図 (a), (b) に示す。対象とした陀峯山 (標高 438 m) の南側斜面では、海岸から標高 400 m の山稜近くまで急斜面が連続しており、とくに標高 100 m 以下では 40~60° の急崖をなしている。陀峯山の北側および西側はやや緩傾斜である。また、山頂から北東には2列の尾根が延びている。

第4図 (b) に示すように、この地域の呉花崗岩は中粒～粗粒黒雲母花崗岩であるが、島の南東部および南西部は細粒黒雲母花崗岩となっている。また、NNE-SSW 方向に花崗斑岩の岩脈が多数認められたのをはじめ、小規模な流紋岩および白雲母を含む細粒黒雲母花崗岩の岩脈をいくつか確認した。山頂から北東へ延びる尾根と河谷は、こうした岩脈とそれに関連した節理面に規制されたものと考えられてきた (松浦, 1997)。

2. 急斜面の特徴とその形成過程

八幡川地域では峡谷の谷壁斜面、東能美島地域では海岸から山稜にいたる急斜面を節理面測定的主要な対象とした。個々の急斜面の特徴を以下に述べる。

前者の谷壁斜面では両側の標高 200~350 m は 35~50° の急斜面となっている。斜面部分は等高線の出入りがあるが、急斜面を刻む顕著な支谷は存在しない。また、斜面内には上流の一部を除いて段丘面や緩傾斜面は認められない。したがって、前述したように更新世を通じた山地の隆起に伴って下刻され、現在にいたったと推定される。

八幡川の上下流方向では、魚切ダムのすぐ上流側に遷急点が見られることから、下刻速度はこれを境に上流部は下流部よりやや軽微であった可能性がある。また、今回対象範囲に含めた八幡川支流の荒谷川沿いは、流域が狭く、河谷は浅い。全般に風化が進んでいるのは、これを反映して下刻速度が八幡川のそれに比較して小さかったためと考えられる。

窓ヶ山周辺等の標高 450~600 m にも露岩を伴う急斜面が存在するが、それらは残丘地形部の山腹斜面であるため、形成過程は八幡川等の谷壁斜面とは異なるであろう。長期間にわたって風化と支流河川による弱い浸食を受けてきたと推定される。

一方、東能美島は倉橋島などと同様に急峻で、海岸平野はほとんどなく、かつ山腹にも段丘面を含めた緩斜面は見られない。対象とした急斜面は等高線の出入りが少なく、斜面を刻むような顕著な支谷は低標高部の海岸沿いの一部を除いて

存在せず、したがって斜面全般にかなりの期間風化されてきたと推定される。

この斜面は、標高 100 m 以下ではとくに急となっているが、海岸沿いのこうした急斜面は後期更新世の海面低下期から支流河川等によって浸食され続けてきた結果と推定される。斜面中の谷部に見られる比較的新鮮な露岩はこれを示している。なお、海面直下では斜面が緩傾斜となっていることから、海水準面が現在の状態近くになった以降、海岸付近の斜面は波浪等によって浸食されてきた可能性もある。

急斜面に発達する節理系の特徴

両地域の花崗岩中には広範囲にわたって系統的な節理面が発達している。八幡川地域では、本流の魚切ダム兩岸の谷壁斜面(標高 230~300 m)、支流荒谷川兩岸の谷壁斜面(標高 130~250 m)、窓ヶ山山腹斜面(標高 450~600 m)などに節理面が広く現れている(濱沖, 2006)。また東能美島地域では海岸道路に沿った掘削法面の他、いくつかの採石場に節理面が広く現れている(崎村, 2004)。

両地域とも節理面の走向・傾斜と間隔は必ずしも一定ではないが、比較的高角度のもの(60~90°)と低角度のもの(10~30°)に分けられる。前者は連続性に乏しく、短いものが多い。これに対して後者は比較的連続性がよく、わずかに湾曲しているものもある。両者は互いに交錯していることが多いが、場合によっては低角のものが優勢となっている。また、低角と高角の節理面が交錯した急斜面では、部分的にトップリングの発生跡が認められた。

低角のものをシーティング節理面とよぶことにすると、1 箇所まで 2 方向のシーティング節理面が存在し、互いに斜交していることもある。例を第 5 図 (a) に示すが、ここでは NW-SE および E-W の 2 方向のシーティング節理面が 8~22° で南西または北東に傾斜している。したがって、どちらか一方は斜面とは逆方向に傾斜していることになる。

節理の中には短いものが互いにオーバーラップして階段状配列、あるいは雁行配列(en echelon arrangement)をなすものも見られた。この場合、個々の節理面は傾斜角が 20~50° と変化し、下方に凸をなすようにカーブしたものが多い(第 5 図 (b))。

シーティング節理面の間隔は全体として 20~80 cm であるが、密集して 20 cm 以下となっている箇所もあるし、東能美島地域の尾根部のように 100 cm 以上の箇所もある。また、シーティング節理はマサ状風化部でも認められ、そのような箇所では節理面間隔が 0.5~3 cm と狭まっていることもある。

節理面方向の測定結果

1. 節理面方向の測定方法と表現方法

急斜面における節理面の卓越方向を得るため、両地域の多数の地点にて節理面の走向・傾斜を測定した。測定点数は八幡川地域で計 22 箇所(No.1~22)、東能美島地域で計 22 箇

所(No.1~22)である。

測定に際しては岩盤露出面に水平なラインを設定し、これと交差する節理面を測定していく方法をとった。個々の測定箇所ごとの測定数は 50 前後を計画したが、結果としては露出状況に応じて 20~95 と一定していない。このため、測定箇所ごとの情報は必ずしも同精度ではないが、大局的な節理面の傾向を読み取ることは可能である。

個々の測定点ごとに、走向・傾斜データから π -ダイアグラムを作成した。これは節理面のポールをシュミットネット(下半球)上にプロットし、小円による移動平均をへて、コンター表現したものである。第 6 図 (a), (b) は両地域における測定点の位置とそこでの π -ダイアグラムを示したものである。方向の卓越性を示すダイアグラム中のコンターは外側から 0-5-10-15-20% とした。

2. 八幡川地域における測定結果(第 6 図 (a))

以下で取り上げる測定点としては、窓ヶ山付近を除いて、八幡川本流では魚切ダム左岸で計 5 箇所(No.6~10)、同右岸で計 4 箇所(No.11~14)である。また、支流の荒谷川では左岸で計 2 箇所(No.15, 16)、右岸で 4 箇所(No.19~22)である。それぞれにおける節理面の状況を以下に述べる。

(a) 魚切ダムの左岸と右岸(No.6~14)

左岸側の No.6~10 では低角のものとして E-W の走向で南に傾斜したもの、および NW-SE の走向で南に傾斜したもの、さらに NE-SW の走向で南に傾斜したものが認められた。高角節理面については NE-SW の走向で南または北に急傾斜しているものが目立ち、これは低角節理面に直交している。

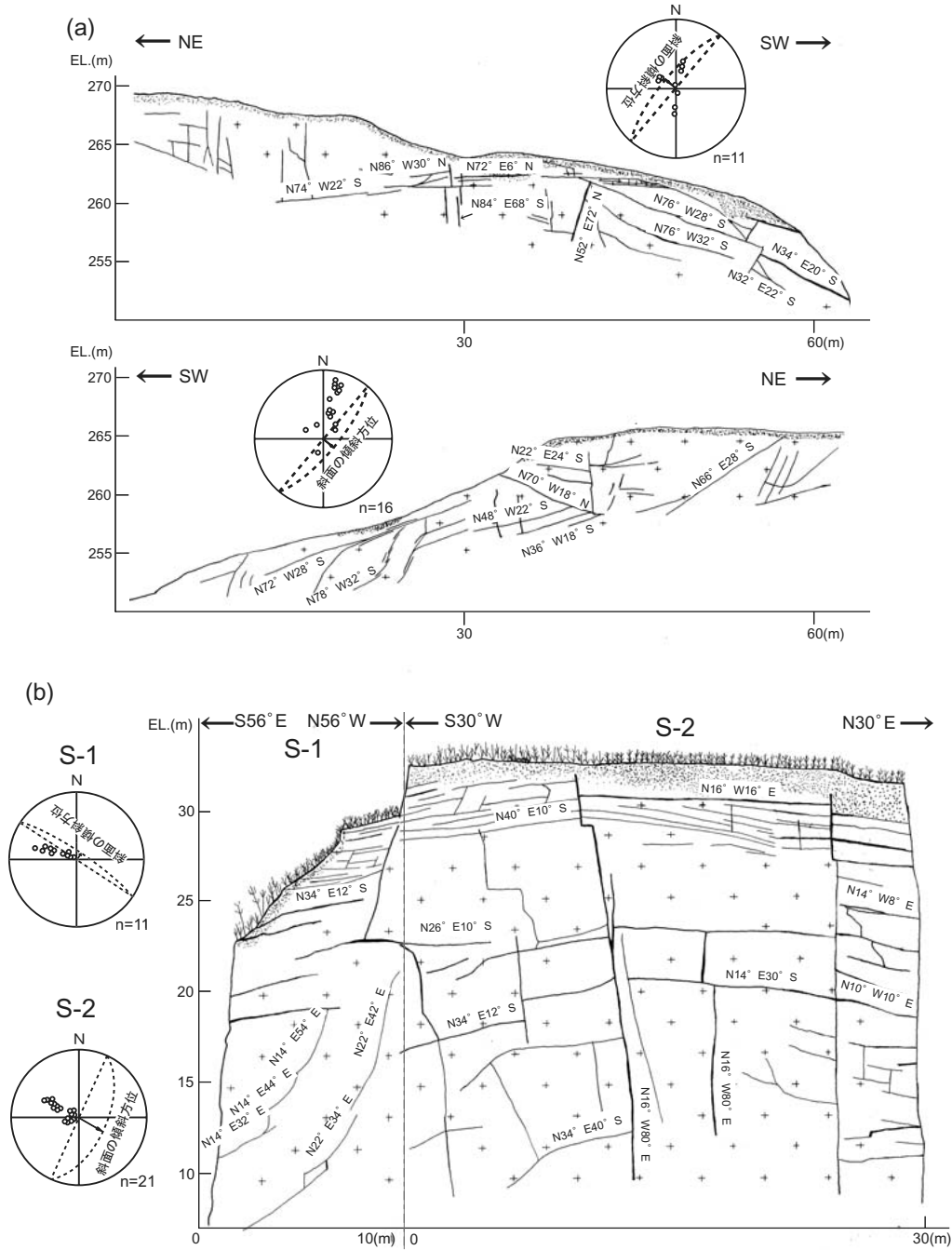
右岸側の No.11~14 では低角のものとして E-W の走向で北に傾斜したもの、および NW-SE の走向で北に傾斜したものが卓越している。高角のものとしては NNE-SSW や NW-SE の走向のものがあるが、走向・傾斜のバラツキが大きい。

左岸の代表的な測定点 No.8 (EL.250~260 m) では、N 4° E/10° E, N 70° E/22° S などの低角節理面に加えて、N 60° W/82° N, N 24° E/78° S の高角節理面も存在する。また、右岸の測定点 No.11 (EL.260~270 m) では N 46° W/18° N, N 72° E/24° N のような 2 方向の低角節理面が目立つ。谷壁斜面にて 2 方向の低角節理面(シーティング節理面)が交錯している箇所では、どちらか一方が谷壁斜面に調和的となる。

(b) 支流の荒谷川流域(No.15, 16, 19~22)

低角節理面は左岸側では No.15, 16 に示すように、河道に沿って NW-SE の走向で南に傾斜したもの、および NE-SW の走向で南東に傾斜したものが卓越している。また、No.19~22 では、河道方向で北東または北西に傾斜したものが卓越しており、ここでも低角節理面が 2 方向存在している。高角節理面は八幡川本流よりも目立ち、NNE-SSW の走向が卓越しているが、走向・傾斜のバラツキは大きい。

代表的な測定点 No.15 (EL.160~170m) では、N 82° W/14° S, N 62° E/30° S などの低角節理面に加え、N 22° E/78° S, N 24° W/74° S の高角節理面が現れている。また、No.22 (EL.130~140 m) では、N 82° W/18° N, N 68° W/20° N な



第5図 (a) 緩斜面直下に発達するシーティング節理の例 (東能美島地域の林道法面), (b) 急斜面直下に発達するシーティング節理の例 (東能美島地域の海岸採石場法面). (b) の S-1 法面下部には雁行配列を伴った下方に凸をなす節理面がみられる.

どの低角節理面に加えて, $N 54^{\circ} W / 70^{\circ} S$ などの高角節理面も認められる (第6図 (a)).

3. 東能美島地域における測定結果 (第6図 (b))

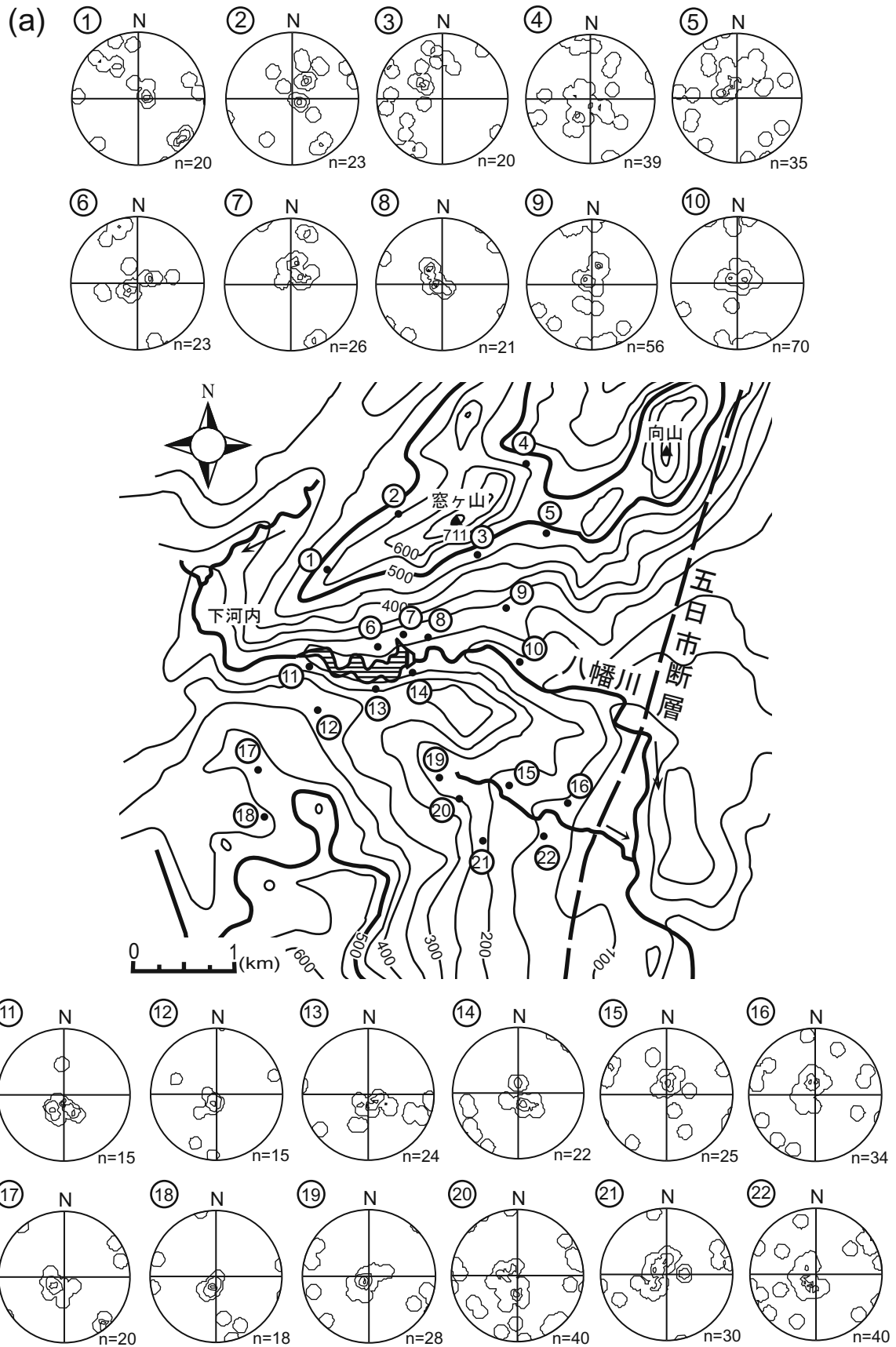
測定点は陀峯山南側にて標高 10~50 m の急斜面で計 8 箇所 (No.12~19), 陀峯山山頂付近, 標高 180~400 m の山腹斜面で計 14 箇所 (No.1~11, 20, 21, 22) である.

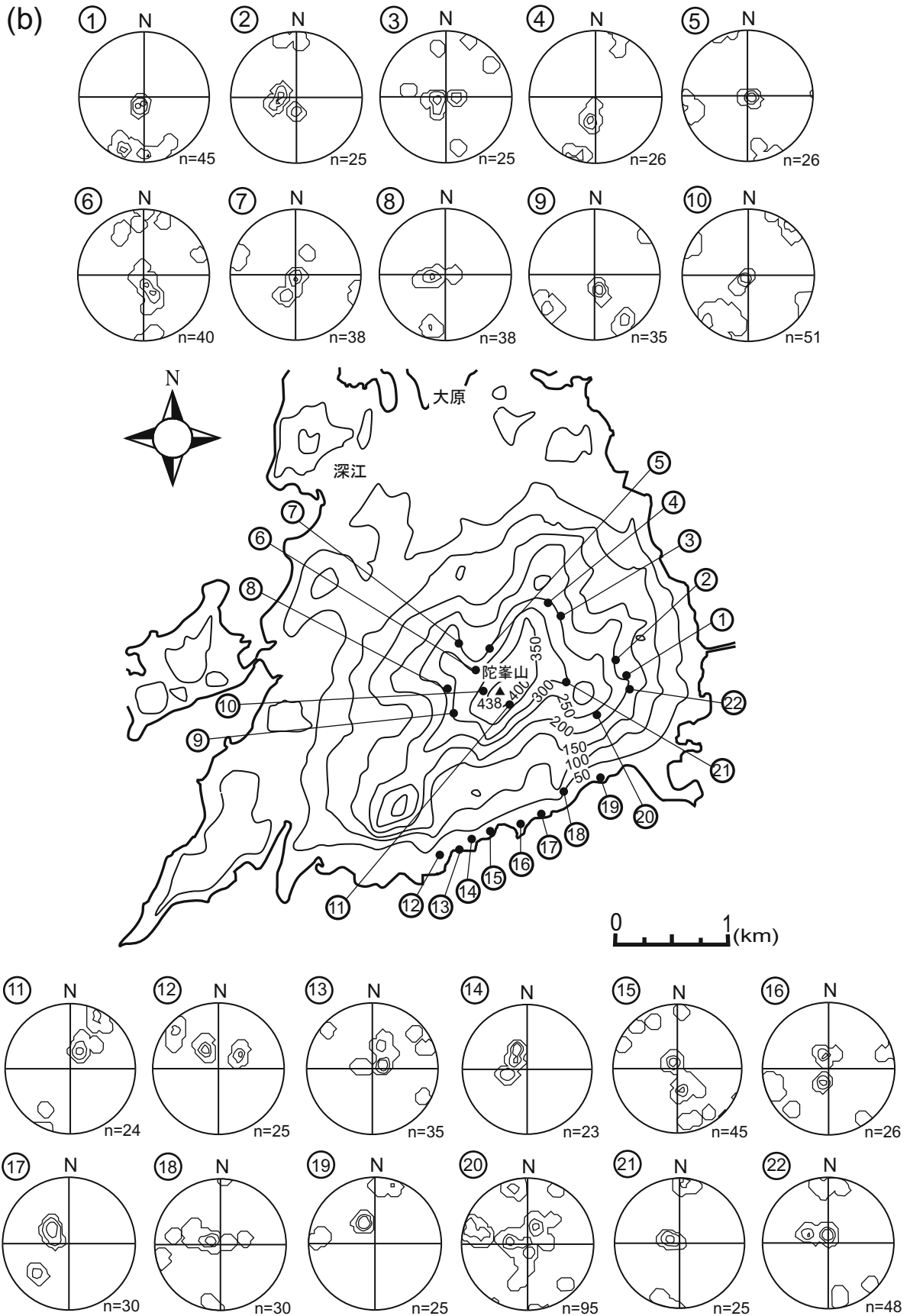
(a) 陀峯山南方海岸沿い (No.12~19)

No.12~19 では, 低角節理面は NE-SW の走向で南に傾斜

したもの, または NW-SE の走向で南に傾斜したものが卓越し, 個々の斜面と調和的である. ここでも, 低角節理面が 2 方向認められる. 一方, 高角節理面については, NNE-SSW ないし NE-SW の走向で南または北に傾斜したものが多く, NE-SW 方向の斜面に沿ってはこれと同走向ないしそれに直交する走向が目立つ.

代表的な測定点 No.12 (EL.10~20 m) では, $N 64^{\circ} E / 22^{\circ} S$, $N 44^{\circ} W / 28^{\circ} S$ などの低角節理面に加えて $N 58^{\circ} E / 78^{\circ} S$ などの高角節理面も存在する.





第6図 (続き) (b) 東能美島地域.

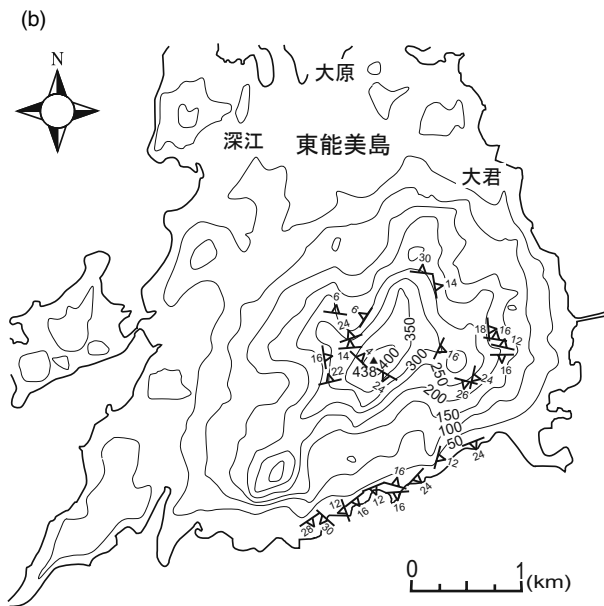
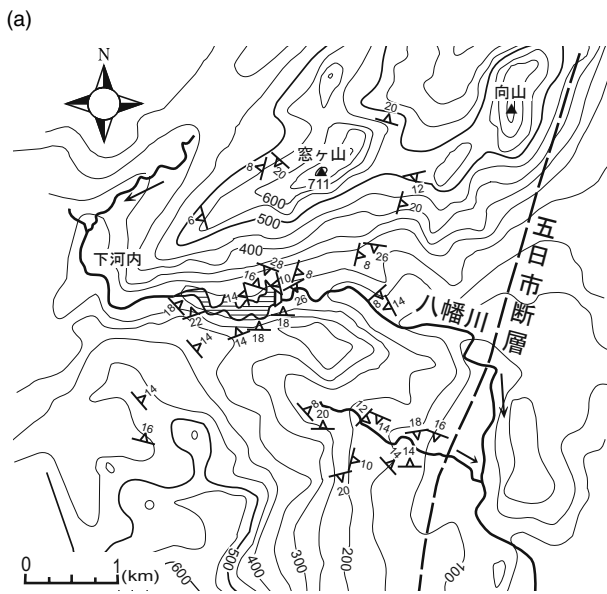
第1表 各測定点における節理面の卓越方向. 個々の走向・傾斜は第6図(a), (b)のダイアグラムから読み取ったもの.

(a) 八幡川地域

| 測定地点 | 低角節理(シーティング節理) | | 高角節理 | |
|-------|----------------|------------|------------|------------|
| No.1 | N10°W/6°W | | N40°E/74°N | |
| No.2 | N30°E/8°W | N50°W/20°S | N58°E/70°N | |
| No.3 | N34°E/20°S | | N30°E/82°S | |
| No.4 | N70°W/20°N | | N82°E/72°S | |
| No.5 | N60°E/12°S | N20°E/18°E | N42°E/60°S | |
| No.6 | N10°W/14°W | N40°W/16°N | N74°E/68°S | |
| No.7 | N80°W/28°S | N20°W/20°W | N72°W/68°S | N64°E/82°N |
| No.8 | N4°E/8°E | N70°E/26°S | N60°W/82°N | N24°E/78°S |
| No.9 | N60°E/12°S | N20°E/18°E | N50°E/60°S | |
| No.10 | N30°E/8°S | N26°W/14°W | N84°E/76°S | |
| No.11 | N46°W/18°N | N72°E/22°N | | |
| No.12 | N60°W/14°N | | N64°W/70°N | |
| No.13 | N54°E/14°N | N88°E/18°N | N24°E/66°W | |
| No.14 | N74°E/18°N | | N24°W/64°E | |
| No.15 | N82°W/14°S | N62°E/12°S | N22°E/78°E | N24°W/74°W |
| No.16 | N80°W/16°S | N70°E/20°S | N30°E/82°S | |
| No.17 | N48°W/14°N | | N48°W/74°N | |
| No.18 | N74°W/16°N | | N64°W/72°N | |
| No.19 | N60°W/8°N | | N34°E/80°S | |
| No.20 | N84°W/20°N | | N54°E/74°N | |
| No.21 | N14°E/10°E | N80°E/20°S | N12°W/80°W | |
| No.22 | N82°W/14°N | N68°W/14°N | N54°W/70°S | |

(b) 東能美島地域

| 測定地点 | 低角節理(シーティング節理) | | 高角節理 | |
|-------|----------------|------------|------------|------------|
| No.1 | N62°W/12°N | | N68°W/76°N | N84°E/78°N |
| No.2 | N4°E/18°E | N82°W/16°N | N74°E/80°S | |
| No.3 | N14°W/14°E | | N32°W/70°S | |
| No.4 | N74°W/30°N | | N74°W/80°S | |
| No.5 | N30°E/6°N | | N28°W/72°E | |
| No.6 | N84°E/14°N | N68°E/26°N | N84°E/80°N | |
| No.7 | EW/6°N | | N18°E/82°E | |
| No.8 | N8°W/16°E | | N74°W/72°N | |
| No.9 | N76°E/22°N | | N34°W/80°N | |
| No.10 | N46°W/4°N | | N50°W/82°N | |
| No.11 | N66°W/24°S | | N60°E/82°N | |
| No.12 | N64°E/28°S | N44°W/30°S | N58°E/78°S | |
| No.13 | N8°W/12°W | | N22°W/76°W | |
| No.14 | N56°E/16°S | | | |
| No.15 | N64°E/12°S | N78°E/28°N | N74°E/74°N | |
| No.16 | N72°E/16°S | N70°W/16°N | N12°W/80°E | |
| No.17 | N46°E/30°S | | N46°W/60°N | |
| No.18 | N26°E/12°E | | N14°W/82°E | N82°W/80°N |
| No.19 | N64°E/24°S | | N70°W/78°S | |
| No.20 | N68°W/26°S | N12°E/24°E | N74°E/72°S | N14°E/68°E |
| No.21 | N18°E/16°E | | N80°W/84°S | |
| No.22 | EW/16°S | | N80°W/72°S | |



第7図 シーティング節理面の卓越方向とその分布. 図中の数値は傾斜角(度)を示す. (a) 八幡川地域, (b) 東能美島地域.

(b) 陀峯山山頂付近 (No.1~11, 20, 21, 22)

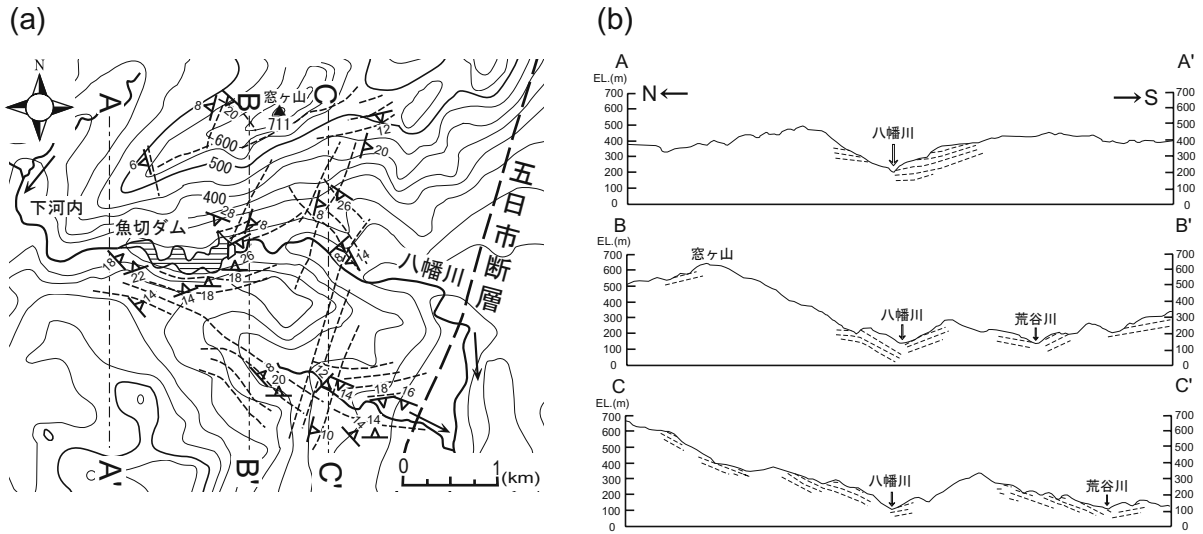
陀峯山東方のNo.1~4では低角節理面はE-Wの走向で北に傾斜したもの, およびNNW-SSEの走向で東に傾斜した低角節理面が確認できるが, ここでも低角のものが2方向存在している. 一方, 高角節理面には, NW-SE方向の斜面と同走向のものが目立つ.

陀峯山西方のNo.6~10では低角節理面はNE-SWの走向で北に傾斜したもの, またはE-Wの走向で北に傾斜したものが認められ, ほぼ斜面と同方向に傾斜している. また, 高角節理面はE-Wの走向で南または北に傾斜したもの, NW-SEの走向で南または北に傾斜したものが認められるなど走

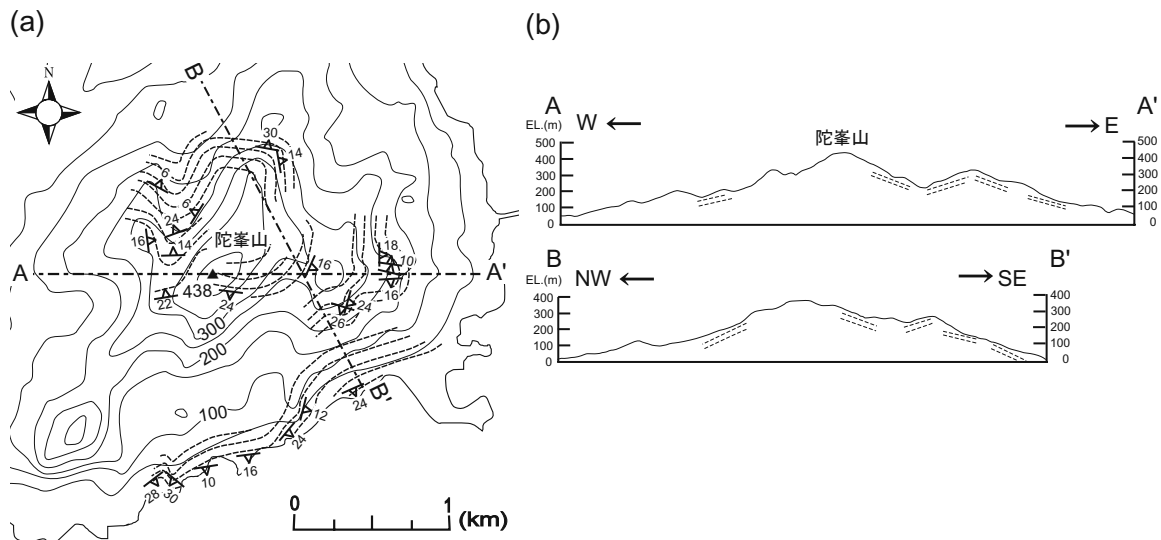
向・傾斜のバラツキは大きい.

代表的な測定点No.2(EL.200m)の卓越方向は, いずれも低角で, N4°W/18°E, N82°W/30°Nなどであった. また, No.6(EL.300m)ではN86°E/12°N, N78°E/22°Nなどの低角節理に加えて, N70°E/72°Sなどの高角節理面も存在する.

これら各ダイアグラムから読みとった個々の地点の卓越方向の走向・傾斜を第1表(a), (b)にまとめ, 具体的な方向を第7図(a), (b)に図示した. 卓越方向が1箇所では複数の場合には, それらをすべて表示した.



第8図 八幡川地域におけるシーティング節理面の卓越方向と走向トレンド(破線)。(a)平面図, (b)断面図(A-A', B-B', C-C')。



第9図 東能美島地域におけるシーティング節理面の卓越方向と走向トレンド。(a)平面図, (b)断面図(A-A', B-B')。

節理面の卓越方向の空間的变化

第8, 9図は第7図(a), (b)をもとにした低角節理面(シーティング節理面)の走向線図と断面図をそれぞれの地域について示したものである。走向線図を大局的な地形図(埋谷幅250 mの接峰面図)上に図示すれば, その空間的变化, さらには斜面との関係を見ることができる。

1. 八幡川地域

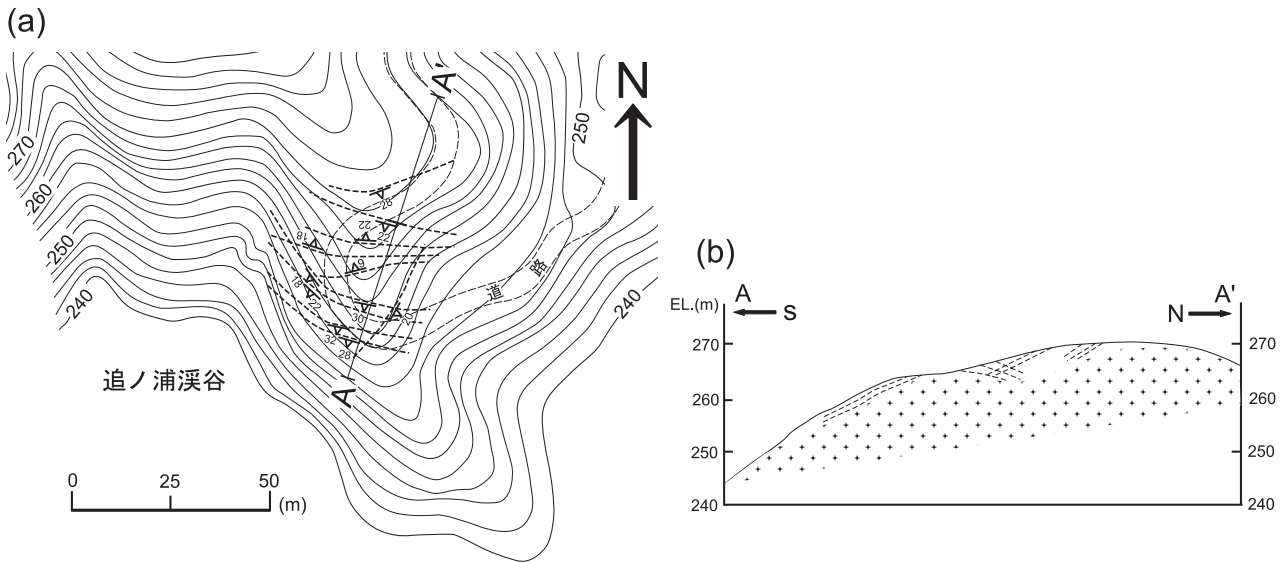
第8図(a)に示すように, 八幡川地域でのシーティング節理面の卓越方向は大きく3方向に分けられる。①E-Wの走向で南傾斜のもの, ②E-Wの走向で北傾斜のもの, ③NE-SWの走向で東傾斜のものである。

①と②の走向トレンドは八幡川ならびに荒谷川の河谷方向, あるいは両者をあわせた浅い河谷全体の方向に調和的

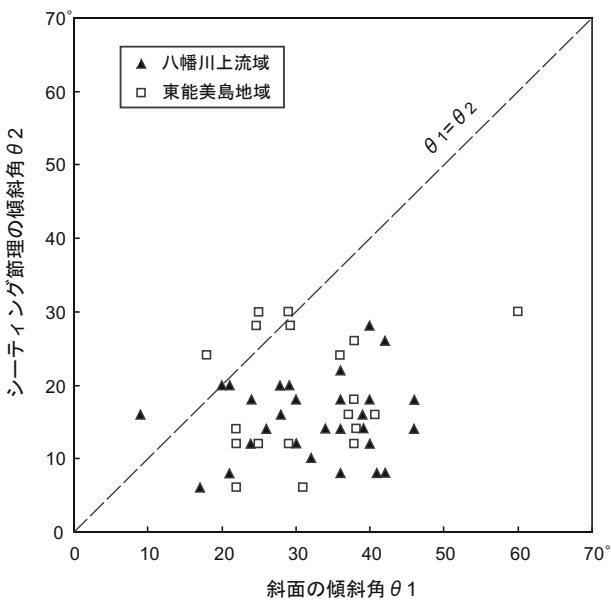
あり, それぞれの谷壁斜面に沿っている。これに対して, ③は上記の河谷とは斜交するが, むしろ五日市断層の断層崖方向に調和的といえる。

第8図(b)は八幡川を横断するN-S方向の断面図である。シーティング節理面の傾斜は谷壁斜面に調和しており, 谷の北側斜面では南側に, 南側斜面では北側に傾斜している。荒谷川に沿っても同様の傾向が認められる。また, 窓ヶ山山腹斜面でも, 尾根の頂上を境界にして南部では南側に, 北部では北側に傾斜している。

シーティング節理面の卓越方向は, このように大局的な谷壁斜面の方向には比較的对応しているが, 詳細な斜面の凹凸との関係で見ると, 対応している箇所もあれば, そうでない箇所もある。



第10図 (a) 陀峯山南側の尾根付近におけるシーティング節理面の方向, (b) 尾根の縦断方向(A-A')における斜面形状とシーティング節理面の傾斜方向.



第11図 各測定点における斜面の傾斜角 θ_1 とシーティング節理面(卓越方向)の傾斜角 θ_2 の関係.

2. 東能美島地域

第9図(a), (b)に示すように, 東能美島地域でもシーティング節理面の傾斜は大局的な山腹斜面の傾斜と調和的であり, 走向トレンドもそれに近い. 傾斜角は場所によって異なるが, 大局的な斜面と平行もしくは若干緩傾斜のものが多くある.

陀峯山の周辺に限れば, 第9図(a)に示すように走向トレンドは同心円状に近く, これは頂部を中心とした山腹斜面に調和的である. この傾向は当初崎村(2004)によって指摘されたが, 今回, さらに測定数を増やして山頂から南東方の尾根部でも斜面に調和的であることを確認した. このような傾向は第9図(b)の断面図でも読みとれる. ただし, これらの

対応関係はそれぞれの測定点における卓越方向であり, 個々の節理面には必ずしも対応していないものも存在する. また, 前述したように, 個々の露頭内で2方向のシーティング節理面が交錯しているものもあることから(第13図(a)の写真参照), 節理面の一部は斜面に対応していない.

第10図(a), (b)は尾根部の道路法面に現れた節理面を用いて, 尾根斜面の形状とシーティング節理面の関係を調べた結果である. 道路は南に突出した尾根をU字カーブで横断し, 道路の掘削法面にはほぼ連続して節理面が現れている(節理面状況は第13図(b), (c)の写真参照).

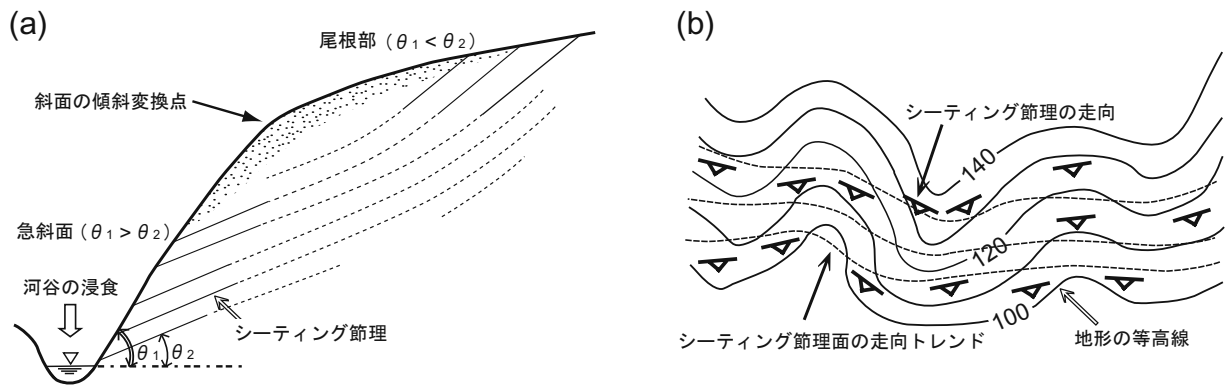
第10図(a)に示すように, 現れたシーティング節理面はNW-SE走向やE-W走向, NNE-SSW走向など一定していないが, 全体としては南に突出した尾根斜面をとりまくように, それぞれの位置で斜面に対応した方向で現れている. たとえば, 尾根の西側斜面にはNW-SE走向で東傾斜のものが広く現れているし, 尾根突端部ではE-Wで北傾斜のもの他に, NNE-SSWで東傾斜のものが現れている. これらは尾根斜面の外側に向かって8~22°で傾斜し, 大局的には尾根斜面に調和的である. ただし, 個々の位置では各方向の節理面は互いに斜交している.

尾根の縦断方向(第10図(b))でみると, 前述のように尾根斜面に調和的な南西傾斜のものに加えて, それに非調和な北傾斜のものも存在している.

花崗岩急斜面におけるシーティング節理面

1. 測定結果に基づいた形態的特性

2 地域の花崗岩急斜面に現れた多数の節理面方向を測定した結果, 低角のシーティング節理はいずれの急斜面にも普遍的に存在しており, したがって, それらの形成は花崗岩の冷却過程などではなく, むしろ急斜面の存在が大きく関わって



第12図 (a) 急斜面に発達するシーティング節理面と斜面との関係の概念図(横断面図), (b) 凹凸をもった急斜面とシーティング節理面との関係の概念図(平面図)

いると考えるべきであろう。これは急斜面表層部に生じる不均質な応力状態が節理面の形成に影響していることを意味しており、橋川(1985)の結論を支持するものである。また、斜面形状と調和した雁行状節理面の確認は、斜面表層での重力下の剪断応力が節理面形成に関与している可能性を示している。

測定地点における斜面とシーティング節理面の傾斜角の関係を整理すると、第11図のようになる。これは、個々の測定地点における自然斜面の傾斜角 θ_1 を 1/2,500 の地形図上から求め、シーティング節理面の傾斜角 θ_2 と比較したものである。グラフ中の破線は $\theta_1 = \theta_2$ である。

測定点の斜面の傾斜角 θ_1 は 10~60° であり、尾根部の緩傾斜面から谷壁の急傾斜面まで範囲は広いが、そこでのシーティング節理面の傾斜角 θ_2 は 10~30° に限られている。両者は、緩傾斜面、急傾斜面のいずれにおいても $\theta_1 > \theta_2$ 、すなわちシーティング節理面が斜面より 15° 前後緩傾斜となっている。

ただし、詳細にみると、比較的急傾斜な $\theta_1 > 30^\circ$ の斜面ではほぼ $\theta_1 > \theta_2$ であるのに対し、 $\theta_1 < 20^\circ$ の緩傾斜面では一部に $\theta_1 < \theta_2$ の場合もみられる。とくに、東能美島地域の尾根斜面では後者の場合が大半であった。

第11図をもとに、斜面とシーティング節理面の関係を谷壁斜面の断面図上に概念的に表すと、第12図(a)のようになる。急傾斜面部分ではほぼ $\theta_1 > \theta_2$ であるが、傾斜変換点より高標高の尾根斜面では $\theta_1 < \theta_2$ になる場合がある。谷壁斜面などでの $\theta_1 > \theta_2$ の関係はシーティング節理面に沿って平面すべり (translational sliding) が起こりやすい条件をつくり出している。

第12図(a)に基づけば、節理面の傾斜角 θ_2 は、尾根部では急傾斜面部よりもわずかに大きくなる傾向がある。これは、断面上でのシーティング節理面のトレースは、全体としてわずかに湾曲する傾向にあることを意味している。

一方、第12図(b)は第8図(a)および第9図(a)に基づいた谷壁斜面の平面的形状と節理面の走向との関係を概念的に示したものである。図には節理面の走向トレンドを示しているが、これは斜面の凹凸と多少対応している。凸斜面では

節理面の走向トレンドもわずかに凸になり、凹斜面では同じく凹となっている。ただし、節理面走向トレンドが示す凹凸は等高線のそれよりも小さく、谷の切れ込みがあっても節理面は緩やかに対応している。

節理面走向トレンドのこのような変化は、個々の地点で見ると、2方向以上の複合した節理面のどちらかが顕著になることに対応しているようである。

シーティング節理面の中には、尾根部にてわずかな凹凸に対応しているものもあり、したがって、それらは浸食過程における斜面形状の微妙な変化に対応して形成されてきたと推定される(第12図(b))。

対象地域は長期的には浸食速度の大きな地域であり、結果として、シーティング節理面は斜面の開析過程における特定の時期の急斜面に対応して形成されてきたと推定される。また、それらの組み合わせが現在の斜面内で不安定な状態をつくりだしており、斜面ハザード予測にあたっては平面すべりに加えて、クサビすべりの発生も考える必要がある。こうした節理面と急斜面との関係が普遍的なものであれば、シーティング節理面の発達した地域での岩盤斜面の掘削形状や安定評価に際してはこの関係を十分考慮する必要がある。

ま と め

広島地域に多い急斜面でのシーティング節理に限定し、節理面の形態・卓越方向と斜面との関係を2地域における測定データをもとに検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 花崗岩急斜面には、いくつかの系統的な節理面の現れることが多いが、そのうち、低角のシーティング節理面に関しては斜面の傾斜方向と同方向に傾斜したものが多く。
- (2) シーティング節理面の間隔は場所によって様々であるが、なかには密集したり、マイクロシーティングを伴ったものもある。また、短い節理面が複合して雁行状を呈するものもある。
- (3) 個々の節理面の方向にはバラツキが認められるが、平均化して卓越方向を求めると、傾斜角は斜面より 15° 前後緩



第13図 花崗岩急斜面に発達するシーティング節理の状態。

(a) 互いに斜交した2方向のシーティング節理面(八幡川地域), (b) シーティング節理と高角節理の関係(東能美島地域), (c) 連続性の良好なシーティング節理(東能美島地域), (d) 互いに交差した2方向のシーティング節理面が形成するクサビ(東能美島地域), (e) 連続性の良好なシーティング節理とそれに切られた高角節理(東能美島地域の採石場), (f) 雁行配列をなすシーティング節理面(東能美島地域の採石場)。

傾斜になっている。したがって、V字型の谷壁斜面では、両側とも谷側に向かって傾斜している。ただし尾根部の傾斜角では、それよりわずかに急となっていることが多い。
 (4) シーティング節理面の走向には斜面の大局的な走向と対応している箇所が多い。したがって、節理面の走向トレンドは大局的な斜面等高線に平行となる。

(5) 対象とした花崗岩には岩石組織上の異方性が見られないことから、上記の斜面との対応はシーティング節理の形成が花崗岩の冷却過程ではなく、現在の斜面の形状と形成過程に大きくかかわってきたこと意味している。
 (6) ただし、詳細にみると、シーティング節理面の卓越方向は1地点でも複数方向存在することがある。これは、斜面

形成過程ともかわり、いくつかの段階の斜面形状と応力条件に対応して形成された節理面が複合した結果と見ることもできる。

- (7) 複数方向のシーティング節理が存在する場合には、山稜部の細かい尾根地形でも、それに対応して、調和的な方向のものが現れていることがある。
- (8) このような急斜面上での斜面と調和したシーティング節理面の存在、さらには複数方向の存在は、斜面表層での平面すべりだけでなく、クサビ崩壊をもたらす恐れがあり、斜面ハザード予測という点でも重要である。

文 献

- Billings, M. P., 1972, *Structural Geology*, (3rd, ed.), Prentice-Hall, N.J., 606 p.
- Bradley, W. C., 1963, Large-scale exfoliation in massive sandstones of the Colorado Plateau, *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **74**, 519-528.
- 千木良雅弘, 1999, 風化と崩壊, 財団法人深田地質研究所, 206 p.
- 千木良雅弘, 2000, 1999年6月広島県集中豪雨による斜面崩壊多発地域に地質的素因, 1999年6月西日本の梅雨前線集中豪雨による災害に関する調査研究, 平成11年度科学研究費補助金研究成果報告書(研究代表者 福岡捷二), 33-46.
- Chigira, M., 2001, Micro-sheeting of granite and its relationship with landsliding specifically after the heavy rainstorm in June 1999, Hiroshima Prefecture, Japan, *Engineering Geology*, **59**, 219-231.
- 藤田勝代, 2002, 花崗岩中のラミネーションシーティング研究の現状と課題, 深田地質研究所ニュース, no.61, 7-22.
- 藤田勝代, 2003, 香川県小豆島の花崗岩類に発達するラミネーションシーティングのロックコントロールと構造規制, 深田地質研究所年報, no.4, 155-174.
- 藤田勝代・横山俊治, 2006, 深度750m調査ボーリング孔の花崗岩の割れ目の分布様式(1)シーティングジョイントの発生間隔の深度変化, 日本応用地質学会平成18年度研究発表会講演論文集, 417-420.
- 濱沖俊史, 2006, 広島県八幡川上流域における花崗岩中のシーティング節理と斜面崩壊, 鳥根大学総合理工学部地球資源環境学科卒業論文, 68 p.
- 橋川邦武・宮原健二, 1974, 風化花崗岩類の構造とその工学的意義について(その1), 応用地質, **15**, 1-11.
- 橋川邦武, 1978, 風化花崗岩類に発達する Sheeting Joint の P 波速度におよぼす異方性とその解析, 応用地質, **19**, 21-29.
- 橋川邦武, 1978, 開析ペディメントにおける風化花崗岩類の風化帯構造—広島市西部の深層風化帯について—, 応用地質, **19**, 45-49.
- 橋川邦武, 1985, 花崗岩体表層部に発達する面状破壊構造に関する研究, 広島大学地学研究報告, no.25, 1-37.
- 東元定雄・松浦浩久・水野清秀・河田清雄, 1985, 呉地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 93 p.
- 加古満則・横田修一郎, 2002, 鳥取県日野川上流域における花崗岩斜面中のシーティング節理, 鳥根大学地球資源環境学研究報告, no.21, 49-58.
- 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, 437 p.
- Kitagawa, R., 1999, Weathering mechanism and slope failures of granitic rocks in Southwest Japan—Effect of hydrothermal activities—, *Slope Stability Engineering*, 108-114.
- 松浦浩久, 1997, 倉橋島及び柱島地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 53 p.
- 西川直志・北村晴夫・石田毅・澤田晴彦, 2001, 山口県鳴滝地区岩盤崩落対策の概要, らんどすらいど, no.30, 71-84.
- Ollier, C. D., 1969, 風化—その理論と実態, 松尾新一郎訳, ラテイス, 417 p.
- Price, N. J., 1966, Fault and Joint Development in Brittle and Semi-brittle Rock, *Pergamon Press*, Oxford, 176 p.
- 崎村信行, 2004, 瀬戸内海, 倉橋島及び東能美島における花崗岩中のシーティング節理と斜面崩壊, 鳥根大学総合理工学部地球資源環境学科卒業論文, 52 p.
- 瀬尾孝文, 1991, 応力開放による岩盤の劣化と斜面変動, 「斜面地質学—その研究動向と今後の展望—」, 日本応用地質学会編, 47-48.
- 瀬尾孝文・都甲正司・菊山浩喜・横山俊治・北川隆司, 1995, 広島花崗岩中に発達するシーティングの垂直分布について, 日本地質学会第102年学術大会講演要旨, 305.
- 山田直利・東元定雄・水野清秀・広島俊男・須田芳朗, 1986, 20万分の1地質図「広島」, 地質調査所.
- 横田修一郎, 1974, 滋賀県湖南山地における花崗岩中の節理系, 地質学雑誌, **80**, 205-214.
- 横田修一郎, 1996, シーティング節理, 「新版地学事典」, 平凡社(東京), 地学団体研究会編, 550-551.
- 横田修一郎・森山哲朗・安藤進一・浜崎晃・大坂理, 1999, 地質的にみた広島市亀山地区の土砂災害, 日本応用地質学会中国四国支部平成11年度研究発表会論文集, 21-24.

(受付:2007年9月28日, 受理:2007年11月26日)