

3次元地質モデルと転石を利用した地表地質踏査

横山俊治

深田地質研究所

Three-dimensional Geological Model and Surface Geological Exploration using Boulders

YOKOYAMA Shunji

Fukada Geological Institute

要旨：地質調査業界の喫緊の課題は3次元地質モデルの作成方法の確立である。現在ボーリング調査で得られた地質情報を活用する方法が試みられているが、ボーリングデータは線の情報（1次元）であるので、3次元地質モデルの構築は容易ではない。この論文では、3次元地質モデルを直接構築することができる転石を利用した地表地質踏査を提案する。この探査手法は露頭情報だけでなく、転石情報を積極的に利用するところに特徴がある。転石を活用することによって、踏査ルート上での地質情報の欠落が少ないルートマップの作成が可能になる。ルートマップと地形から岩相境界の形態を予測し、それを踏査で検証する。転石を利用した地表地質踏査によって構築された3次元地質モデルをボーリング調査で検証する。

キーワード：3次元地質モデル、転石を利用した地表地質踏査、ボーリング調査、岩相分布図、地質図

Abstract: An urgent issue in the geological survey industry is the establishment of a method for creating three-dimensional geological models. Currently, methods to utilize geological information obtained from borehole investigations are being attempted, but since borehole data is linear information (one-dimensional), it is not easy to construct a three-dimensional geological model. In this paper, we propose a surface geological exploration using boulders that can directly construct a three-dimensional geological model. This method is unique in that it actively utilizes not only outcrop information but also boulder information. The use of boulders makes it possible to create a route map with little missing geological information along the survey route. The morphology of the lithologic boundary is predicted from the route map and topography, and this is verified during the field trip. A three-dimensional geological model constructed by surface geological mapping is verified by borehole investigations.

Keywords: three-dimensional geological model, surface geological exploration using boulders, borehole investigation, lithologic distribution map, geologic map

1. はじめに

地質調査業界の喫緊の課題は3次元地質モデルの作成方法の確立である。現在、地質データを取得する調査技術としてボーリング調査が考えら

れている。早川ほか（2022）による座談会「DX: Digital Transformation」でも、3次元地質・地盤モデル作成の調査手法としてボーリング調査が取り上げられ、ボーリング技術のICT導入やデータのデジタル化に関して意見が交わされた。

しかしながら、ボーリングデータは線の情報（1次元情報）である。線の情報をいくら増やしても、3次元地質モデルをつくるのは難しい。ボーリングデータから2次元地質断面を作成するのも容易ではないのが現実である。たとえば、地層が水平であってもボーリング間隔が広い場合には地層の対比は難しく、さらに地層が傾斜している場合は地層を安易につなぐこともできない。褶曲している場合はボーリングデータから褶曲の存在を予測することすら難しい。また、断層も同じで、ボーリングデータに断層の記録がない場合は、ボーリングとボーリングの間に断層の存在を予測することは難しい。それならボーリングの本数を増やせば良いという意見もあるが、3次元地質モデルの作成に必要な単位面積あたりのボーリングの本数や配置に関する提言はない。

施工段階になって、地質が原因の事故や、事故に至らなくても工事の停滞や手戻りが発生することがある。原因の一つは調査不足にあるが、その背景には日本の地質の複雑さがある。地質の複雑さ故に地質調査の結果に不確実性が生じる。それが予測と実際との間で乖離を引き起こし、事故につながる。不確実性をできるだけ少なくするためには、ボーリング調査一辺倒の調査手法の見直しが必要である。

本論文では、直接3次元地質モデルを構築することができる転石を利用した地表地質踏査を提案する。この地表地質踏査は、露頭情報だけでなく転石情報も最大限に活用しているところに特徴がある。地質調査の手順として、地表地質踏査をボーリング調査に先行させることを提案する。具体的には、地表地質踏査の成果である3次元地質図から2次元地質断面図を作成し、地質断面図上でボーリングの調査位置・深度を計画して、その結果で地質図を修正し、3次元地質モデルの精度

を上げていく方法である。

2. 地表地質踏査の二つの流儀

地表地質踏査には大きく分けて二つの流儀がある。一つの流儀は、露頭のみを重視するもので、ここでは「露頭を利用した地表地質踏査」と呼ぶことにする。今一つの流儀は、露頭だけでなく転石も重視するものである。日本の山地はほとんどの地域で露頭出現率よりも転石出現率の方が遙かに高いので、ここでは「転石を利用した地表地質調査」と呼ぶことにする。

3. 露頭を利用した地表地質踏査の特徴

はじめに、露頭を利用した地表地質踏査について、その方法を論じている二人の研究者の言説を紹介する。以下、「」内は原著論文中の本文を引用したところである。

狩野（1992）は、「地層や断層・褶曲などの一般走向にできるだけ直交し、露頭状況が良好そうで、かつ距離があるいくつかの代表的ルートを選定し、そのルートに沿って層序・構造などを詳しく調べていく」、「露頭条件が良くメインルートとなる場合が多いのは、林道か中規模河川の川底に沿ったルートであろう」と述べ、「尾根付近の露頭は風化が進行している場合が多く、植生の多い山腹斜面は道のない限り歩行が困難で、露頭も極めて少ないか、あったとしてもクリープを起していることが多い」としている。

一方、坂（1993）は、「地表地質踏査とは、崖、海岸、川岸、沢筋など、岩石が露出しているところ（露頭, outcrop, exposure）で観察を行って調査を進める方法で、普通、地質調査（geological survey）といえはこの方法を指す」とし、「尾根

は一般に露頭状態が不良であるため、沢ほどには重要視されない」としている。そして「尾根は両側の沢で得られたデータをつなぐうえで貴重な存在である」と述べるにとどまっている。

二人に共通しているのは、崖や海岸、道路の切り割りを除けば、沢をメインルートとして重要視していることで、調査ルートの選定がこのようなになったのは、露頭を重視した結果である。坂(1993)が告白しているように、露頭のみしか利用しない地表地質踏査では、両側の沢のデータをつなぐしか、地質図を描きようがなかったことが想像できる。

転石についても二人の言説がある。狩野(1992)は「このようなルート(筆者注:尾根のルート)でも岩相分布のデータとして転石には注意を払わなければならない。地質図を作成する場合には転石の分布も重要な情報になる。これを“転石地質学”という」と述べている。

坂(1993)は転石をいくつかのタイプに分け、「① 転石か露頭かを断定できない岩体、② 明らかな転石であっても斜面を一面覆っていて露頭の表面と見なして良い岩屑、③ 供給源の露頭を確認する必要がある岩石については、その岩石種にあてた色で記号化して記入しておけば、露頭をなしていることが確実な岩石と区別することができるうえ、データとしての価値をもつ。逆に転石も大いに利用価値がある。沢をつめている足元の転石はすべて上流あるいは斜面上方からやってきたものであるので、いわば、その先に露出している岩石の予告編ないし在庫カタログとなる」と述べている。

二人とも、転石の価値を一応認めているが、積極的に転石を活用しているとは思えない。自らの地表地質踏査の流儀を表明している研究者や技術者に会うことは少なく、ルートマップを併記し

た地質図が掲載されている論文自体が少ない。学術の世界では、沢を主たる踏査ルートとし、転石にはほとんど顧みないで露頭のみを利用した地表地質踏査が主流であると想像される。

4. 転石を利用した地表地質踏査の特徴

4.1 転石のみかた

転石を利用せざるを得ない最大の理由は日本の山では露頭率が低いからである。しかも露頭の分布が偏っているからである。にもかかわらず、転石の利用を躊躇しているのは、地表の転石がその直下の地山の岩石と同じであると断定できるかどうか、不安があるからである。

地質調査会社では設立以来ボーリングが主要な調査技術になっている。ボーリング調査では必ず転石を含む地表付近の斜面堆積物とその直下の地山のコアが同時に得られる。そこで、ボーリング調査地点の微地形に注意を払いながら、転石と地山の岩石の種類が同じかどうかを調べてみた。それで分かったことは、崖錐堆積物や河川堆積物が厚く堆積した谷底は別にして、ほとんどの場所で両者は同一種類の岩石であった。特に尾根上の転石は間違いなく地山の岩石を反映している。山腹斜面では、ボーリング地点の上方に崩壊地がある場合や地表水の流路になっている場所で、転石と地山の岩石の種類が異なることがあったが、微地形に注意を払えば、転石から地山の岩石の種類が推定できることが明らかになった。

実際の地表地質踏査では、できるだけ小さい転石を使って岩石鑑定を行うことが求められる。それは大きな転石ほど転がりやすいからである。下位に泥質岩層、上位にチャート層が分布している山腹斜面では、チャートは大きな転石を生じて転がりやすくて当てにならないことが多いので、最

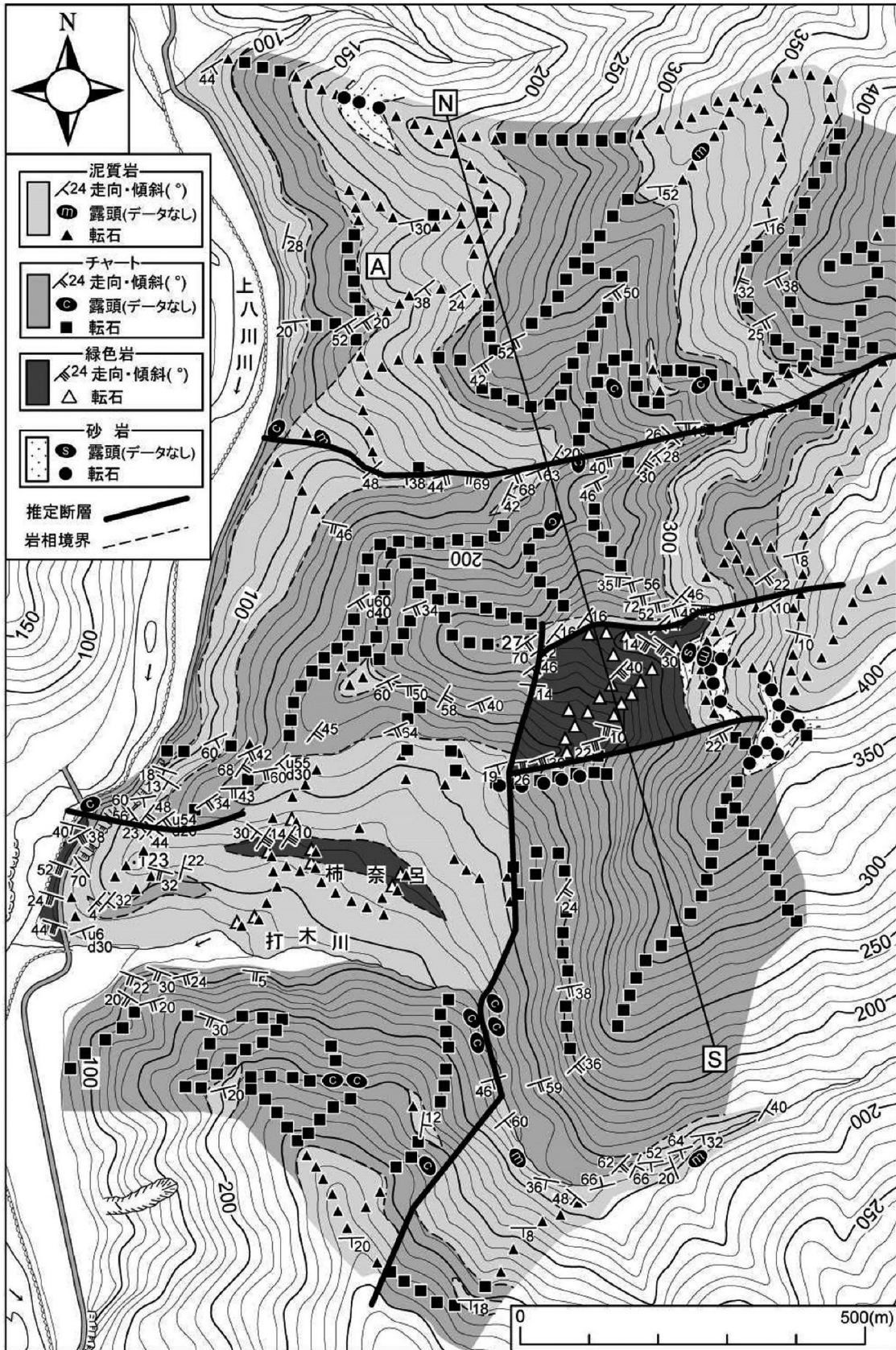


図1 柿奈呂地域の地質図とルートマップ (田中・横山, 2007) (高知県吾川郡吾北村森林基本図其14に加筆).

も斜面上方に位置する泥質岩の転石でもって地層境界とすると不確実性が小さくなる。踏査ルートを通る沢の転石には斜面上方に分布する地層から出てきたものが含まれる。そういった転石は坂(1993)のいう予告編にあたり、心に留めておくことで役立つことがある。

図1は、転石を利用した地表地質踏査で作成した高知県の町柿奈呂地域の地質図で、それにはルートマップも掲載されている(田中・横山, 2007)。地質は、緑色岩やチャート、砂岩からなる厚いスラブや岩塊が泥質基質(泥質岩)中に分布し、全体としてメランジュを構成している。脇田ほか(2007)によれば、調査地のほとんどの地域は秩父(累)帯北帯の勝賀瀬ユニットに属するジュラ紀付加コンプレックスであるが、中央部にはジュラ紀付加コンプレックスを原岩とする三波川変成コンプレックスの思地ユニットが分布するとされている。しかしながら、現場での岩石の肉眼鑑定では両者を識別することはできなかった。

踏査ルートは、岩相境界の追跡を目的にしているため、沢のルートに固執することなく、尾根や山腹斜面も調査している。この地質図は、露頭と転石の岩相を記録したルートマップを用いて作成されている。図2には、調査地域で測定された岩相境界面および片理の走向・傾斜がシュミットネット下半球投影図に示されている。狭い地域の計測結果であるが、走向・傾斜はばらついているので、片理の走向・傾斜を手がかりに岩相を繋いでいくのは無理があると思われる。露頭情報だけでは地質図は描けないということである。

4.2 踏査ルートの選定はどうするか

転石を利用した地表地質踏査において、踏査ルートの選定はこうでなければいけないというルールはない。ただ、調査の初期段階で全体の地

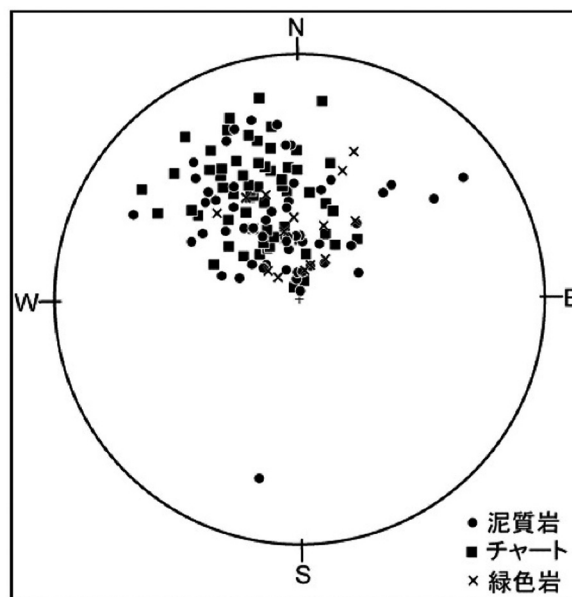


図2 柿奈呂地域で計測された岩相境界面および片理の走向・傾斜のシュミットネット下半球投影図(田中・横山, 2007)。

質状況を把握し、かつ追跡可能な岩相境界の目星をつけておきたいと考えるなら、露頭状況が良好そうで、かつ距離がある沢を選ぶのが良い。その際、沢を尾根の稜線まで登り詰め、帰りは登ってきた沢の隣の尾根を下る。これを1セットとして左右に広げていくのが良い。沢沿いを踏査するメリットは、谷底から両谷壁にかけて地質や地形のみならず、植生をも広く観察することができる点にある。条件が良ければ、この段階で鍵層になる地層の3次元的広がりが予想できることもある。

踏査の安全を考えると、沢を登り尾根を下るのが鉄則である。特に暗くなってから、初めての沢を下ってはいけない。尾根の下りでも霧が出ているときや暗くなる時には注意が必要である。尾根の稜線を歩いているつもりでも、山腹斜面を下っていることがある。線状凹地が発達している尾根では稜線を外してしまい、線状凹地から谷に入ってしまうことがあるので特に注意が必要である。

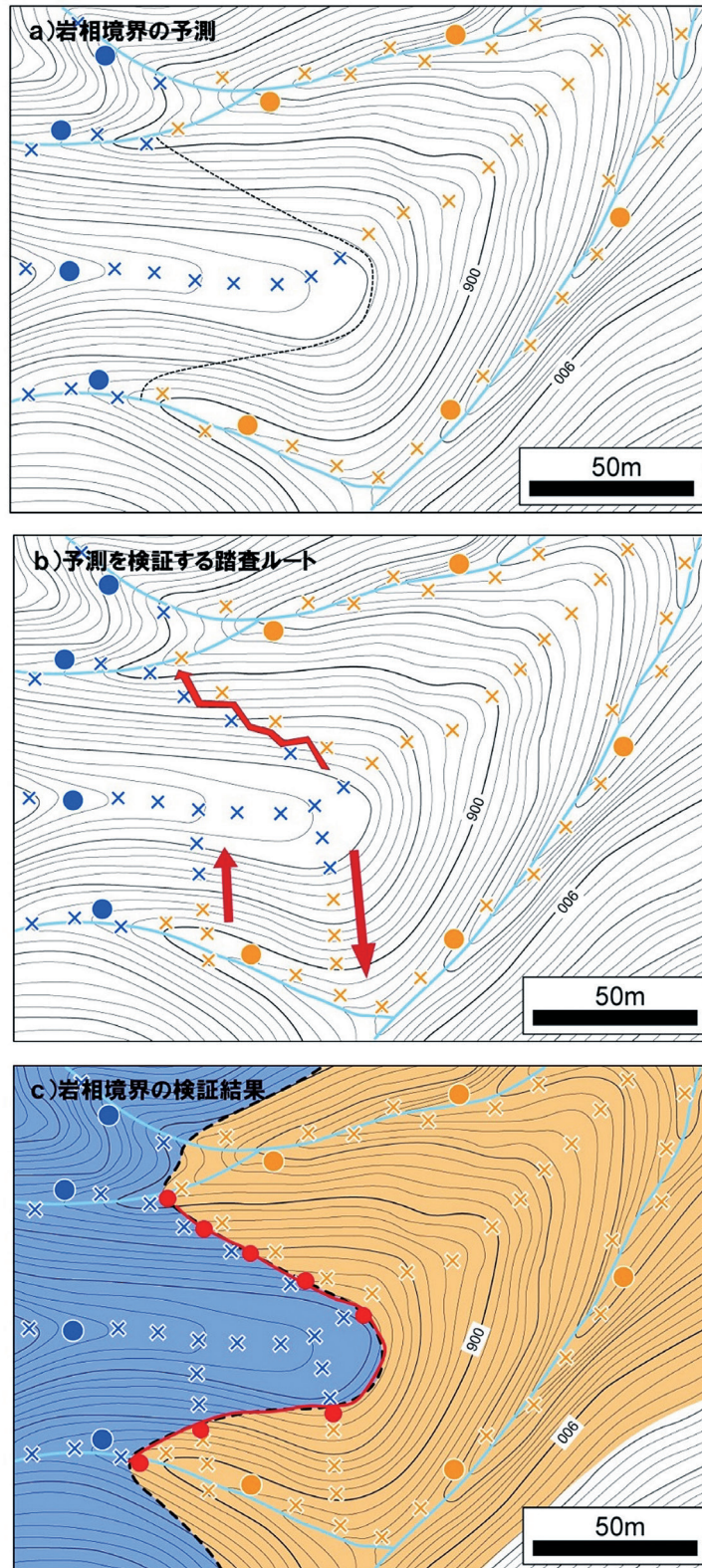


図3 転石を利用した地表地質踏査による岩相境界の予測と検証の流れを示した概念図.

a) ルートマップから予測した岩相A(青色)と岩相B(柿色)の岩相境界線(破線)

b) 予測を検証する踏査ルート(赤矢印の向きは踏査方向)

c) 岩相境界線の検証結果(赤丸は確認された岩相境界地点)

山腹斜面の踏査は、次節で述べるように岩相境界モデルの検証が目的のことが多い。その際のルート選びでは、急傾斜の斜面を選ぶと、露頭・転石の出現頻度が高く、短い距離の踏査で目的を達することができる。シダや笹が地面を覆っているところは、足を地面につけることもままならず、転石を探すのも苦勞する。低木が密集している斜面も歩きにくい。こういった場所ではできれば避けたい。山道や獣道は表土が削られているので、露頭や転石の出現率が高い。風倒木の根元やヤマイモを掘った跡も転石を見つけやすい。踏査ルートの最終的な選択は総合的判断になるが、勘が冴えているときは、苦勞少なく大きな成果を得ることができる。日頃から山に慣れ親しんでいると、ルート選びの直観力が鍛えられる。

4.3 転石を利用した地表地質踏査による岩相境界の予測と検証

図3は、転石を利用した地表地質踏査による岩相境界の予測と検証の流れを示した概念図である。図3のaは、二つの谷とその間の尾根のルートマップの岩相Aと岩相Bの岩相境界点と地形から予測した岩相境界の形態を示している。図3のbは、予測モデルの妥当性を検証する際の踏査ルートを例示している。図3のcは検証結果を示す。ほぼ予測した標高地点で岩相境界が見つかり、両岩相の上下関係が予測通りであれば、予測した岩相境界の形態は検証されたことになる。検証のための踏査ルートを増やしていけば、岩相境界の精度は上がる。

予測が外れることもある。その場合は岩相境界の形態を新たに予測して、再度妥当性を踏査で検証する。予測と検証を繰り返していくことで精度の高い岩相分布図に近づいていく。岩相分布図は現場で作成するものであって、机上で作成する

ものではない。

4.4 岩相分布図から地質図へ

岩相分布図は、岩相間の構造的関係については何ら説明していない。岩相分布に加えて、整合、不整合、断層、貫入といった岩相間の構造的関係を示したものが地質図である。作成順序からいっても、先に作成されるのが岩相分布図であるから、その精度が悪いと岩相間の構造的関係の解釈を誤り、地質図の精度が落ちるのは明らかである。しかしながら、岩相間の構造的関係を直接現場で観察できる機会は少ないので、限られた観察結果とそれまでの研究成果に基づいて解釈されるのが一般的である。

学問の進歩とともに、岩相間の構造的関係の解釈が変わっていくことがある。たとえば、付加体モデルでは、チャートや緑色岩は沈み込み過程で生じたスラブや岩塊と考えられ、泥質岩との岩相境界は一種の“断層”（破断面）であるとされているが、地向斜モデルの時代は同じ岩相境界を整合であると考えられていた。

このように岩相分布図の作成段階では地質学的な解釈が入っていなくても、岩相分布図から地質図を作成する段階でその時代の学問成果を反映した解釈が入ってくる。地質図は地質構造を3次元で表現したモデル図であり、解釈図である。

5. 考察

5.1 地質図の精度をどう評価するか

図4と図5は同一地域の地質図であるが、調査者が異なる。調査地の地質は美濃帯に属するジュラ紀付加体で、チャートのスラブや岩塊が泥質基質（泥質岩）中に分布し、全体としてメランジュを構成している。地質図の作成においては、

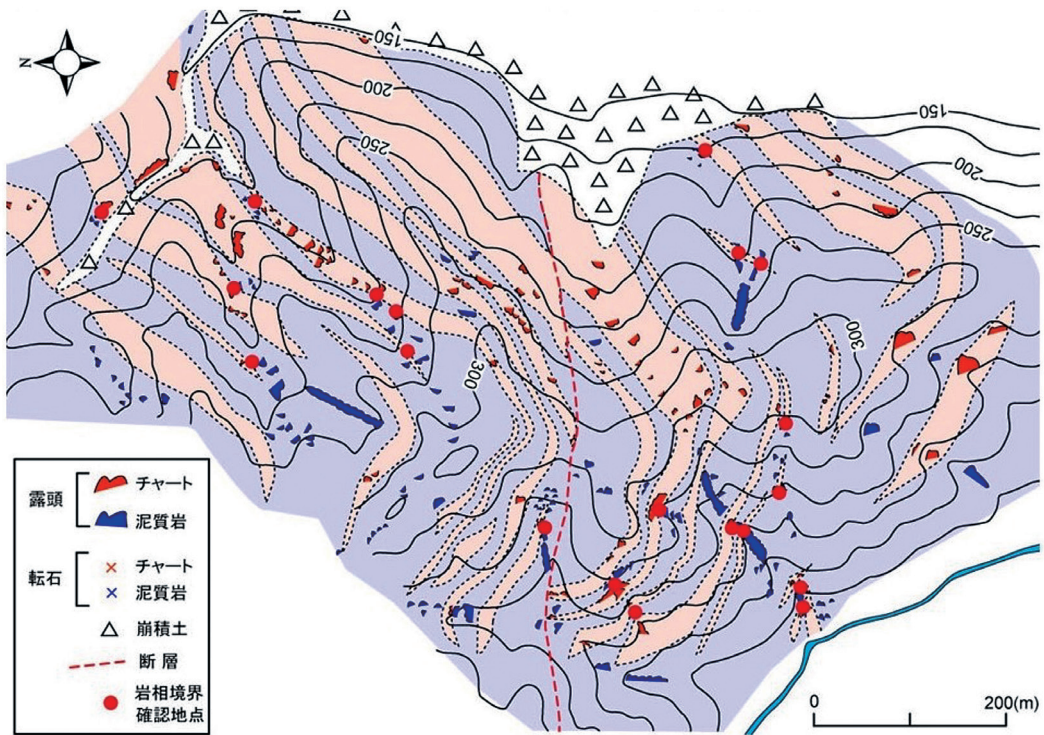


図4 露頭を利用した地表地質踏査によって作成された地質図.

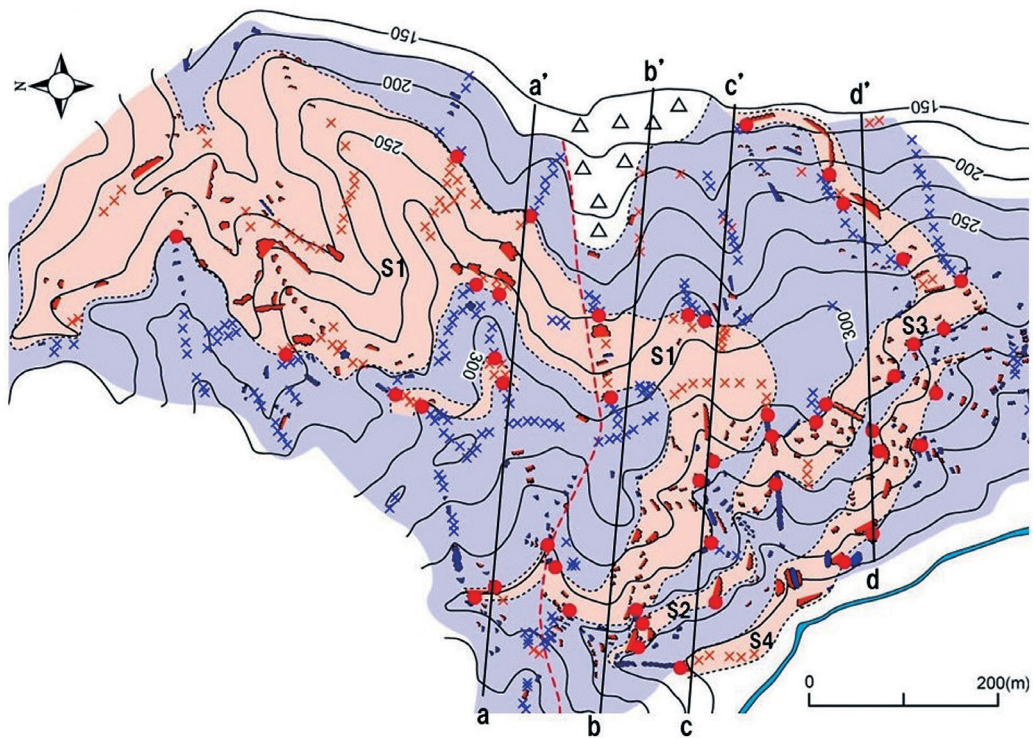


図5 転石を利用した地表地質踏査によって作成された地質図.
a-a', b-b', c-c', d-d' : 地質断面図の位置, S1 ~ S4: チャートスラブの記号

観察されたチャートの露頭がマップスケールのチャートスラブの一部を見ているのか、小規模な岩塊を見ているのかの判断が必要である。

図4の踏査ルートはほとんど沢筋に限られ、ルートマップには転石の記載がない。転石を利用していないので、踏査ルート上での地質情報の欠落が多いルートマップになっている。地質図は露頭を利用した地表地質踏査で作成されたものと推察され、露頭で得られた片理の走向・傾斜を使って岩相境界を推定し、それを露頭情報のない領域にまで延ばして描かれている。

図5の地質図は転石を利用した地表地質踏査で作成されている。踏査ルートは、沢筋に限定されず、尾根や山腹斜面にも及んでいる。また、ルートマップには露頭だけでなく、多くの転石が記載されていて、踏査ルート上での地質情報の欠落は少ない。地質図では、岩相境界点を結んで岩相境界が描かれ、ルートマップに描かれた岩相の広がりも地質図を描く上での重要な情報になっている。

地質図が作成された1990年代初頭、上記二つの地質図のうち、精度が良いのはどちらかという議論になったが、当時は地質図の精度を評価する手法が確立されていなくて、決着が付くことなく物別れに終わった。その後、露頭と露頭、露頭と転石、転石と転石の間で、岩相境界が5m以内で押さえられた地点の数で地質図の精度を評価する方法が考案された(横山, 2007)。岩相境界地点の数は図4の地質図で19地点、図5の地質図で46地点となり、後者の方の精度が良いと判定される。

図4の地質図では、全体に岩相境界地点の押さえが少ないだけでなく、全く岩相境界が押さえられてないチャートスラブが多数描かれている。これは問題である。一方、図5の地質図では、岩相境界地点を抑えるだけでなく、ルートマップに

描かれた岩相の分布も活用することで、不確実性の少ないチャートスラブの形態が把握できたと考えられるが、岩相境界地点の間隔が離れているところは調査精度が低いことには変わりはない。

岩相境界が押さえられている地点数を数えることは機械的であるので、地質図の精度判定は明確である。自らが作成した地質図においても、岩相境界地点の間隔が離れているところを検出することで、調査精度の自己診断ができる。ルートマップは地質図の反証可能性を保証するものである。地質図にルートマップが併記されていないと、次の調査や施工時に調査データを見直すことができないので、地質図の価値は半減する。

5.2 転石を利用した地表地質踏査とボーリング調査を組み合わせた地質調査の展望

ボーリングは線の情報であるが、地中内部の“もの”(コア)を直接手に取って目視することで、詳細な地質情報を得ることができるだけでなく、地表からは分からなかった岩相境界面も把握できる。ただし、事前に地質情報が全くないと、どこにどれくらいの深度のボーリングを実施すれば、3次元地質モデルの作成に必要な情報が得られるか、見当が付かない。その道筋をつけるのが転石を利用した地表地質踏査による地質図の作成である。

地質図があれば、それから2次元の地質断面図を作成し、地質断面図上で岩相境界面を予測し、それをボーリングで検証することができる。しかしながら、地質図に描かれたチャートスラブであっても、尾根を越えて両側の斜面に分布しているチャートスラブでないと、地質断面図からチャートスラブの岩相境界面を推定することはできない。地質断面図から岩相境界面が推定できるのはチャートスラブS1とS3である(図5)。チャー

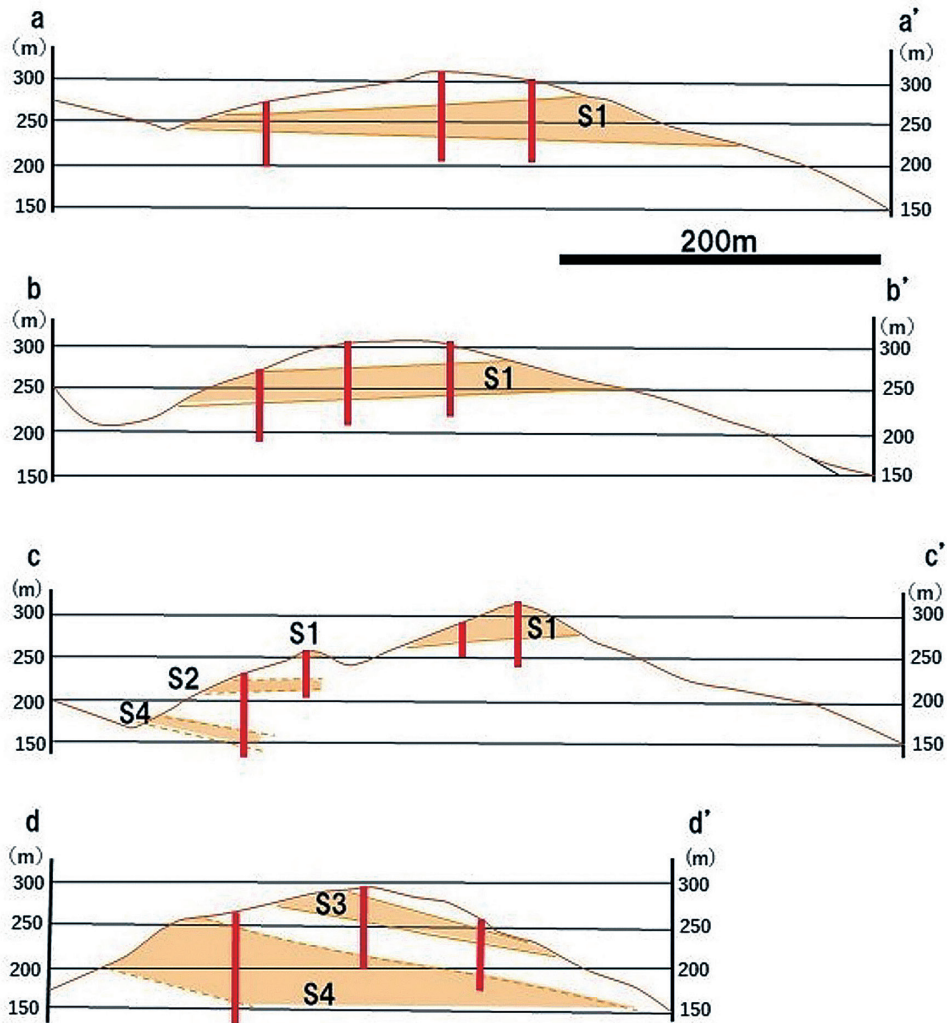


図6 地質断面図 (図5に地質断面図の位置を示す)
 S1-S4 : チャートスラブの記号, 赤色実線 : 計画ボーリングの位置と深度

トスラブ S2 と S4 は片方の斜面にしか分布していないので、近傍のチャートスラブ S1 あるいは S3 と平行な岩相境界面を仮定するしかない。

図6の地質断面図 (a-a', b-b', c-c', d-d') に示されているボーリングはチャートスラブの岩相境界面を検証するために計画した案である。実際の調査では、臨機応変の対応が必要である。まず、最初のボーリングはどれから始めるのが地質構造を理解しやすいかを考え、さらに掘削途中であっても状況に応じて深度は変更する。そして、得られた調査結果に基づいて次のボーリング地点

と深度を決める。

国土交通省はDXを推進するなかで3次元地質モデルのデジタル化を推奨している。転石を利用した地表地質踏査とボーリング調査を組み合わせで作成した地質図(3次元地質モデル)は、デジタル化によって利用価値が高まると期待される。しかしながら、ボーリング調査で得られた地質情報のみを1次情報として、ソフトウェアによって創造されたデジタル3次元地質モデルは、1次情報の数が限られるので、反証可能性の保証が難しくなる恐れがある。

6. おわりに

地表地質踏査は総合的技術である。沢登りや崖登りを安全に行う技術や踏査ルートを選び方、転石のみかたに始まって、地形図の読図技術や現場で地形をみる知識、岩石の肉眼鑑定や構造地質学ほか地質学の知識、さらには危険な動植物の見分け方と対処方法など、様々な知識や技術を総合的に使う。

1970年代初頭から今日に至るまでの時期を振り返ってみると、地表地質踏査に役立つ知識や技術は増え続けている。特にここ20年の間に、航空レーザー測量で得られた数値標高モデル(DEM)のデータを用いて作成した種々の地図の入手が比較的容易になり、携帯用の簡易レーザー測距儀を用いた現場計測が可能になるなど、地表地質踏査も様変わりした。加えて、地震や重力によるノンテクトニックな構造に関する知識が増え、山の地形や地質のみかたが変わり、さらにダメージを受けた樹木から地盤の変動を読み解く方法が新たに加わった(ノンテクトニック断層研究会編著, 2015; 横山・横山, 2004; 脇田・横山, 2022など)。これからも地表地質踏査には新しい知識・技術が加わっていくと思われる。

地表地質踏査は、分布の偏った情報、質の異なる情報、断片的な情報を総合する技術である。露頭の分布には偏りがあり、その構成岩石は新鮮なこともあれば、風化していることもあるが、地表地質踏査では、いずれの露頭情報も無視することなく利用する。さらには露頭だけでなく、転石の情報も利用してそれらを総合化する。規模の大きな地層構造は断片的な情報しか得られないが、それらを総合して全体像を明らかにしていく。地表地質踏査には野外地質学の方法が集約されている。

文献

- 早川潤・佐々木靖人・大西有三・全邦釘・小松慎二・田中誠・重信純・鹿野浩司・谷川正志(2022): 座談会「DX: Digital Transformation」. 地質と調査, 2, 6-27.
- 狩野謙一(1992): 野外地質調査の基礎. 古今書院, 148p.
- ノンテクトニック断層研究会編著(2015): ノンテクトニック断層: 識別方法と事例. 近未来社, 248p.
- 坂幸恭(1993): 地質調査と地質図. 朝倉書店, 120p.
- 田中昭雄・横山俊治(2007): 付加体の地質図作成の方法—高知県の町柿奈呂地域のジュラ紀付加コンプレックスを例に—. 日本応用地質学会中国四国支部平成19年度研究発表論文集, 85-90.
- 横山俊治(2007): 地表地質踏査技術の伝承. 地質と調査, 3, 19-22.
- 横山賢治・横山俊治(2004): 異常現象を示す樹木をセンサーとする地すべり性開口クラックの検出と解析. 日本地すべり学会誌, 1(3), 41-45.
- 脇田茂・横山俊治(2022): 2008年岩手・宮城内陸地震で発生した荒砥沢スプレッドの地すべり構造と運動像. 深田地質研究所年報, 23, 1-20.
- 脇田浩二・宮崎一博・利光誠一・横山俊治・中川昌治(2007): 伊野地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 140p.