

## P25. 段丘対比・編年における経験的指標の再評価の試み

### Trial reevaluation of empirical index for terrace correlation and chronology

○濱田崇臣, 幡谷竜太, 山本真哉(電力中央研究所), 柳田誠, 佐藤賢(阪神コンサルタンツ)

Takaomi Hamada, Ryuta Hataya, Shinya Yamamoto, Makoto Yanagida, Masaru Sato

#### 1. はじめに

第四紀後期の地殻変動の調査において、段丘は隆起量の指標や活断層の変位基準となり、その時空分布は最も基本的なデータの一つに挙げられる。

段丘面形成年代は、日本では火山灰層序との関係から決定されることが多い。その場合、被覆層中で検出された最も下位の示標火山灰の年代を段丘化の年代と見なすことが多い。しかし、その年代が地形面の開析や段丘堆積物の風化の程度から推定されるものより新しいと考えられる場合が少なくない<sup>1)</sup>。

今日のように火山灰層序学が発展する以前は、地形・地質学の基本的な現象に注目することの重要性が認識され、地形面の開析、赤色土、クサリ礫、ロームの粘土化及びクラックの発達といった侵食・風化の指標により、段丘面の形成年代が定性的に論じられていた<sup>2)</sup>など。しかし、定量化が難しいこと、地点ごとの性状のバラつきが大きいことなどにより、これらの経験的指標の層位学的検討は不十分なままに残されている。これらの指標は、その層位を火山灰層序を使って見直すことにより、数十万年オーダーの現象の中で十万年程度の分解能を持った対比を行う場合、段丘の地質層序の問題解決と対比・編年の信頼性確保に貢献できると考えられる。

段丘礫の風化過程は、近年、西山らなどによる一連の研究<sup>3,4)</sup>などや栗山ほか<sup>5)</sup>などにより、物理的・化学的な変化を定量的なデータで説明する試みがなされている。一方、赤色土については、古土壌が侵食と埋没の均衡した条件での長期間の風化過程の中で形成されるものと考えられており<sup>6)</sup>、これに基づけば赤色土の存在は、最終間氷期に既に段丘化していた地形面に限定される。

そこで、本研究では、経験的対比指標の再評価を目的として、全国の段丘中のクサリ礫・赤色土の出現層準について文献調査を実施した。特に、第四紀後期の隆起量評価<sup>7)</sup>を行う上で重要な、海洋酸素同位体ステージ(MIS)6に対比される河成段丘の分布に着目した。続いて、時代の異なる段丘間の礫の風化程度・パターンの検討を行うため、詳細な段丘対比・編年が行われている中越地域の現地調査ならびに現地で採取した試料の室内分析を行った。

#### 2. 調査内容

##### (1) 既往文献調査による経験的対比指標の有効性再検討

調査対象は、2005年までに公表された段丘に関わる記載がある文献である。収集した文献は、北海道から南西諸

島に至る範囲で、968篇である。これらに基づき、年代データが比較的豊富で周辺地域の模式地となる地域を抽出し(全国で20地域程度)、それらの地域の段丘層序・対比・編年を詳しく検討した。続いて、それらを軸に、周辺地域の段丘との相互の関係を検討した。

段丘対比は、幡谷ほか<sup>8)</sup>の対比・編年の考え方(本講演論文集の発表27の図-2参照)に基づいて、既往データの再解釈を行った。気候変動に対応して段丘面が形成され、時代経過とともに原地形が開析され、段丘を構成する堆積物が風化していくという過程を重視し、地形と地質との対応関係を重視して層序・対比・編年を組立て、それに対して示標火山灰などの年代データが整合的に説明しうるかを検討した。文献から抽出した情報は、火山灰、<sup>14</sup>C年代、地形面の性状・分布形態、段丘堆積物・段丘被覆層の風化、砂礫堆積段丘などに関するものである。火山灰のデータについては、最新の知見<sup>9)</sup>に基づいた。

##### (2) 段丘礫の風化程度に関する調査

本研究の調査対象は、2004年新潟県中越地震の震源付近の魚沼丘陵北東部の河川沿いに分布する段丘である(図-1)。幡谷ほか<sup>8)</sup>によれば、当地域の河成段丘は、空中写真判読による区分と火山灰層序に基づく編年・対比を行っており、それぞれの対比は次の通りである。Hf3面はMIS6よりも古く、MIS8に対比される可能性がある。Mf面はMIS6に対比される可能性が高い。Lf1面はMIS5/MIS4境界～MIS4/MIS3境界頃、Lf2面はMIS3/MIS2境界頃に段丘化したと考えられる。Lf3面の段丘化はMIS2と推定される。Lf4面の段丘化は1万年前頃である。

採取地点は、図-1に露頭番号と共に示した。試料は、露頭毎に礫径が10～20cm程度の礫を15～20個程度、礫種を限定せず、可能な限り礫層の上位から採取した。全採取試料は、切断面の色彩及び有効間隙率を測定した。一部の試料は、XRDの全岩分析を実施した。色彩は、礫試料を岩石カッターで切断・研磨(#150)した断面を、礫の縁と中心を通る直線上で約1cm間隔で、土色計(ミノルタ製SPAD-503)を用いてL\*a\*b\*表色法で測定した。有効間隙率は、岩の調査と試験<sup>9)</sup>の方法で測定した。

#### 3. 調査結果

##### (1) 既往文献の調査の結果

文献調査の結果、地形面の開析程度やクサリ礫、赤色土といった風化指標の分布傾向を把握できた(図-2)。

地形面の開析程度に関する記述は、(a)殆ど開析されて

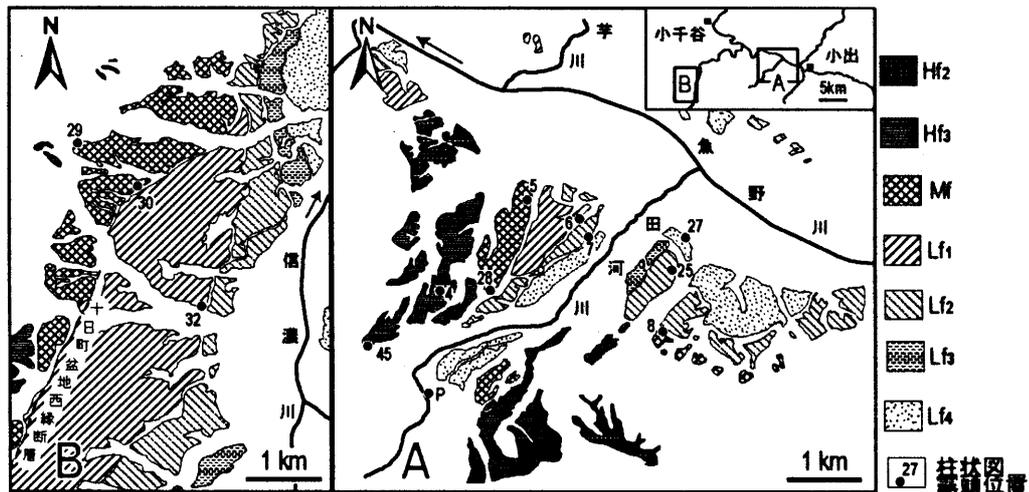


図-1 調査地域付近の段丘面分布図

段丘区分は幡谷ほか<sup>1)</sup>と同じ。試料採取露頭の柱状図は、幡谷ほか<sup>1)</sup>を参照されたい。田河川沿いのP地点は現河床礫の採取地点。

いない (b)開析谷を持つが広い平坦面をもつ (c)平坦部をもつが開析が進む (d)丘陵状、尾根状に分布といった内容であり、それらの段丘はそれぞれ (a)低位段丘 (b)中位段丘 (c)(d)高位段丘として区分されていることが多い。この基準は、ほぼ全国を通じて適用でき、地域的な差は小さい。

礫の風化程度の記載は、(a)新鮮 (b)風化するが硬い (c)クサリ礫が混じる (d)半クサリ礫化 (e)多くがクサリ礫化 (f)チャートなどを除き完全にクサリ礫化といった区分が可能である。ただし、これらの記述のある段丘の層位は、地域ごとに若干異なる。このほか、花崗岩が段丘礫として含まれる場合、それぞれの地域で典型的なクサリ礫が出現する段丘よりずっと若い段丘で風化のため崩れてしまうといった記載が見られ、これらがクサリ礫として記載されている場合がある。

北海道では、十勝平野、富良野などにクサリ礫を混じえる段丘が報告され<sup>10,11)</sup>、MIS8よりも古いと考えられているが、それ以外の場所では、いわゆる高位段丘であってもクサリ礫の記載がほとんど見当たらない。東北地方では、クサリ礫の記載は比較的多く、それらは主に高位段丘であり、MIS7よりも古い段丘と見られる。関東以西では、MIS6に対比される段丘に、しばしばクサリ礫の記載が見られ、相模川沿いのMIS8に対比される寸沢風面では、ほぼ完全にクサリ礫化しているとの記載がある<sup>12)</sup>。

このように、クサリ礫の出現層位には、地域間にずれがある。関東以西で言えば、上記の礫の風化ある段丘は、低位段丘で(a)(b)、中位段丘で(c)(d)、高位段丘で(e)(f)とそれぞれ記載されていることが多い。また、東北地方では、低位段丘が(a)(b)、中位段丘が(b)(c)、高位段丘が(d)~(f)、北海道では低位段丘が(a)、中位段丘が(b)、高位段丘が(c)~(f)というように隣接地方に比べて少しずつズレが認められる。

赤色土は、クサリ礫の出現する段丘と同じか若干若い段丘から出現し始め、多くの場所でクサリ礫が出現する段丘の一段ないし二段低位の段丘から出現する。ただし、クサリ礫に比べて記載のある文献の数が少ない。これは、単に

記述がされていない可能性もあるが、東北南部から関東地方にかけては記述が殆ど無く、分布に明らかな偏りがある。

また、MIS6に対比される(可能性のあるものも含む)段丘は、継続的な隆起が生じていないと考えられるような場所や火砕流堆積物などによって段丘の存在が確認できない箇所を除けば、ほぼ日本全国を通じて分布している可能性がある。

## (2) 風化による段丘礫の物性変化

### a. 風化にともなう有効間隙率の変化

分析の結果、本地域の段丘礫には、経時的な有効間隙率(Ne値)の増加傾向が、概ね認められ(図-3)、既往の研究事例<sup>5,6)</sup>と基本的に整合する。ただし、バラつきが大きく、時間の経過の割にNe値が低い試料も多く含まれる。

Ne値のバラつきは、古い段丘ほど大きい傾向をもつが、同時代のものでも露頭ごとにバラつきの幅は異なる。例えばMf段丘の礫では、Loc.8は他の露頭に比べNe値が高くかつ露頭内での値もバラつきが大きい(図-3)。他ではLoc.28で例外的に大きな値をとる試料が一点あるが、その他は殆どが20%以下で、バラつきはさほど大きくない。つまり風化を受けている礫が含まれる露頭ほどバラつきも大きい、風化を受けていない礫は、すべての露頭に存在する。これまでの結果を見る限り、特定の岩種が特に風化しにくいという傾向は認められない。

一方でHf3段丘(Loc.4のみ)は、その経過年代にも関わらず、Ne値が小さくバラつきが小さい。この試料は、肉眼観察よっても風化程度が弱いと判断され、Ne値はMf段丘と殆ど差がない。分析対象とした岩種は多様であり、特に偏りがあるわけでない。Hf3段丘の試料は現時点ではLoc.4だけであり、更に別の場所の試料を用いて検証する必要はあるが、Hf3段丘の中にもMf段丘と同程度の風化部分が存在することを示唆している。以上のように、段丘礫には露頭間で風化程度に差が生じ、かつ同一露頭内でも時代の経過とともにバラつきの幅は大きくなる傾向にある。

### b. 風化にともなう段丘礫の色彩の変化

部分的に不一致箇所があるが、時代の経過に伴うb\*値の増



図-2 日本全国の主な模式的地域および中越地域の段丘編年とクサリ礫、赤色土の層位

□: 一部がクサリ礫 ■: すべてがクサリ礫 rs: 赤色土 f: 河成段丘 m: 海成段丘 fill: 砂礫堆積段丘。英略字は、示標火山灰で、略号は、新編 火山灰アトラス<sup>8)</sup>に従った。

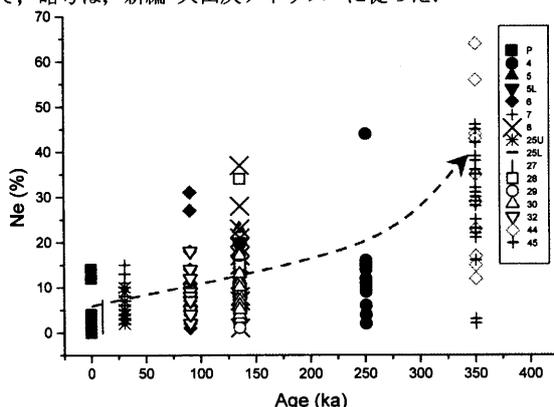


図-3 段丘礫の年代と有効間隙率

プロットデータは、全岩礫試料の有効間隙率。

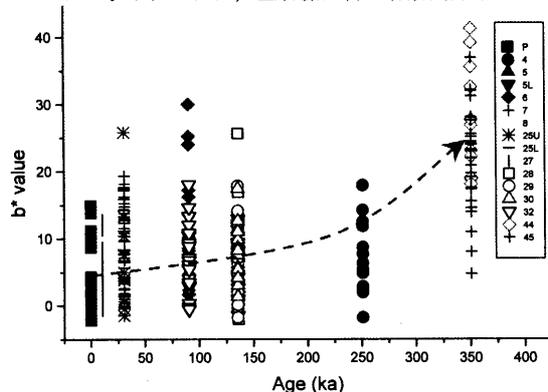


図-4 段丘礫の年代と b\*値

プロットデータは、礫断面の色彩測定値の最大値。

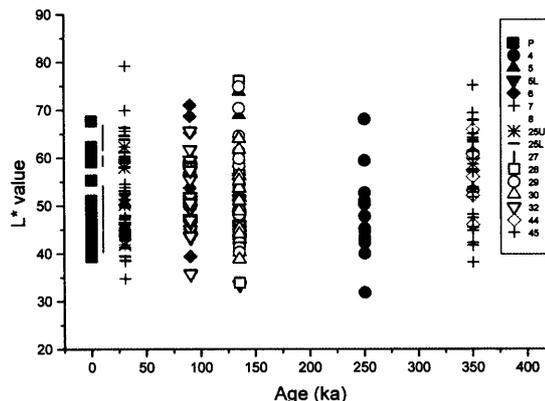


図-5 段丘礫の年代と L\*値  
礫断面の色彩測定値の平均値

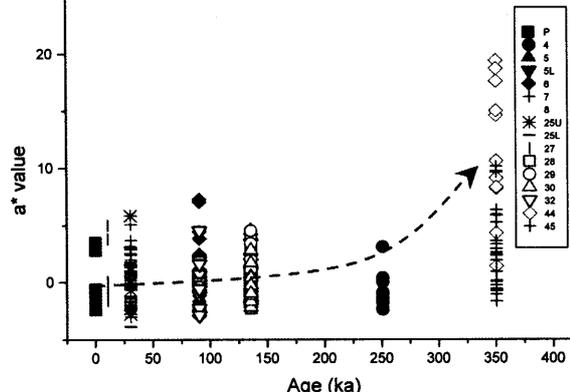


図-6 段丘礫の年代と a\*値  
礫断面の色彩測定値の平均値

加傾向がある(図-4)。L\*値は古さに関係なくほぼ一定の値を示し(図-5)、a\*値は、他の時代のものには明瞭な傾向が見られないが、最も古い H2 段丘には高い値を示す試料が含まれる(図-6)。これは、西山・松倉<sup>3)</sup>が砂岩で報告した、褐色化の初期段階で b\*値が増加し、その後 a\*値が増加する傾向を示

している可能性がある。

また、殆どの岩種で、褐色化の範囲がリム(礫表面)から中心部に向かって広がる傾向を示し、砂岩のように全体が徐々に褐色化する変色パターン<sup>3)</sup>は示さなかった。H2 段丘の礫であっても中心部は完全に褐色化していないものが多い。

以上のことから、本研究では礫の風化程度の指標として、礫のリム部分の色を重視した。しかし、Mf 段丘より低位の段丘の礫では、リムの変色範囲が狭く、土色計の測定範囲(直径 8mm の円)内に、未風化あるいは風化の弱い有色鉱物が残存する部分が含まれ、その影響が測定値に明瞭に現れた。すなわち、有色鉱物に富む岩石はそうでない岩石に比べ、 $a^*$ 値、 $b^*$ 値が相対的に低い。一方、Hf2 段丘のような風化の進んだ試料では、褐色化部分で  $a^*$ 、 $b^*$ 値が相対的に高い。これは初生的に有色鉱物を多く含む岩石の方が、そうでない岩石に比べ褐色化のもととなる酸化鉄鉱物を多く晶出することを示唆している。

段丘礫の風化における酸化フロントの移動速度は 0.02~0.05mm/ka 程度<sup>9)</sup>とされており、これに基づけば、リム部分の褐色化範囲が測色計の測定範囲全体に及ぶには 16~40 万年間程度要すると推定される。また、リム部での風化パターンには漸移的タイプとエッジタイプがあるとされており<sup>10)</sup>これらの風化パターンの違いは、色彩の表れ方にも差が生じさせる可能性がある。

以上のように  $a^*$ 値及び  $b^*$ 値は、風化の進行に従ってその値を増大させるものの、砂岩のような均等に褐色化が進行する岩種を除く多くの岩種については、さまざまな要因によって測定値がバラつくものと推定される。礫の色彩を風化程度の指標とする場合には、これらの要因によるバラツキの効果を確認しておく必要がある。

#### 4. 風化指標の有効性

中越地域における礫の風化程度を分析データから見ると、この地域で MIS6 とした Mf 段丘の礫は、これより新しい段丘に比べて Ne 値のバラつきが大きくかつ Ne 値そのものも大きくなっている。新鮮な河床礫の Ne 値が概ね 20%未満であることや西山・松倉<sup>4)</sup>、栗山ほか<sup>5)</sup>によって測定された風化礫の Ne 値が 20%以上であることなどを考慮すると、Ne 値が 20%を超える礫は野外での観察でも風化を強く受けていると判断することが可能であろうと予想される。このような礫が含まれるのは、Mf 段丘もしくは Lf1 段丘である。Lf1 段丘の“クサリ礫”は極めて少量であり、産出露頭も限定されている。幡谷ほか<sup>1)</sup>では Mf 段丘に若干のクサリ礫が混じり、Hf2 段丘の段丘礫の約 8 割がクサリ礫化しているとしており、露頭における観察結果と、分析値に基づく礫の風化程度は、概ね調和的である。

礫の色彩の変化のうち  $b^*$ 値については、Ne 値ほどの明瞭な変化がなく、かつ値自体のバラつきも大きいので、測定値と野外の観察事実の間にはっきりとした関連性は認めがたい。一方、Hf2 段丘の礫は、顕著に赤色化したクサリ礫であるが、この変化は  $a^*$ 値の変化となって分析値に表れているものと見られる。

以上、分析によって得られた値と野外での観察結果は、矛盾なく説明される部分が多い。このことは、野外での観察事実が、観察者の単なる主観的判断ではなく、客観的な証拠として、段丘対比・編年を行う上で極めて重要である

こと示している。一方、逆説的には、分析結果に見られるバラつきは、野外でも判断を苦しませるバラつきとして存在している可能性が高い。

また、中越地域で MIS6 に対比される段丘からクサリ礫が混じり始めることは、日本全国全体での傾向の中では調和的である。一方で、それより高位の Hf3 面の礫の風化程度が弱いことは全体の傾向からみても特異である。

今回の分析結果は、段丘礫の風化程度が、露頭ごとにかなりバラつきをもつ可能性があることを示している。今後は、多くの試料を分析することによってバラツキの幅やその出現パターンを把握しその影響を排除することや、あるいはバラつきをもったままであっても他の風化指標との組合せなどによって礫の風化度を評価する手段の考案することなどが、段丘対比の信頼性を向上させる上で重要であると考えられる。

#### 5. おわりに

本研究の結果から、内陸部隆起量評価に重要な MIS6 段丘は、開析谷を持つが広い平坦面を持ち、段丘礫の風化が進んでいて関東以西ではクサリ礫が混じるようになり、更に赤色土も東北地方以南ではある場合が増える様子であるとまとめることができる。特定の調査箇所を設定した場合、以上のような特徴に加え、MIS6 段丘がもつ氷期の段丘としての特徴(砂礫堆積段丘であることや paired terrace であること)を持ち、これに加えて MIS5 の示標火山灰に覆われることが確認できれば、MIS6 河成段丘の対比は極めて確実にとなると考えられる。

しかしながら、指標のバラツキの範囲やその原因については今のところ不明な点が多い。経験的指標はバラつきを持つが故にその有効性が疑問視され、ともすると火山灰層序のデータの元に無視されてきた。しかし、被覆層中には不整合が存在することがしばしばあり、また、火山灰は放射年代が改訂されることもある。そういう意味で経験的指標はバラつきがあるが、解釈の分かれることの無い事実として重要である。

本研究のうち、文献調査に関する部分については原子力発電環境整備機構からの受託研究「概要調査における地質環境の調査技術、評価手法の高度化」としてとり行われたものである。

#### 引用文献

- 1) 幡谷ほか(2006): 応用地質, 47, 140-151.
- 2) 岡田(1973): 地理学評論, 46, 295-322.
- 3) 西山・松倉(2001): 地形, 22, 23-42.
- 4) 西山・松倉(2002): 応用地質, 43, 216-225.
- 5) 栗山ほか(2006): 地質学雑誌, 112, 136-152.
- 6) 永塚(1975): 農技研報, 26, 133-257.
- 7) 柳田・吉山(1995): 地学雑誌, 104, 809-826.
- 8) 町田・新井(2003): 新編火山灰アトラス, 東京大学出版, 336.
- 9) 地盤工学会編(1994): 岩の調査と試験, 371-377.
- 10) 十勝団地研究会編(1978): 十勝平野. 地団研専報, 22, 433p.
- 11) 柳田ほか(1985): 地理学評論, 58, 255-265.
- 12) 皆川(1969): 第四紀研究, 8, 1-9.