

斜面発達モデル構築における空間－時間置換の援用：研究小史

A Review of Studies on Slope Development Using a Space-Time Substitution Approach

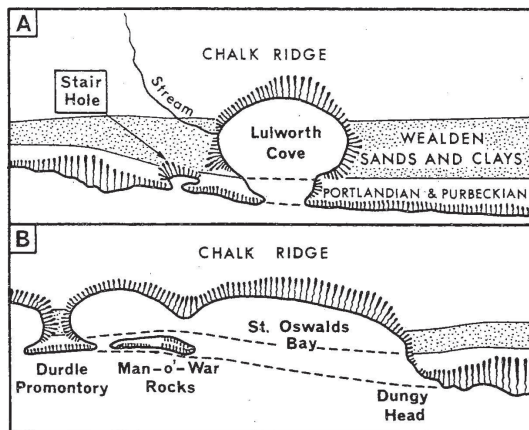
松倉 公憲*

Yukinori MATSUKURA*

1 はじめに

地形学における最近の中心課題の一つとしては、侵食や堆積のプロセスの計測（説明）がある。そして、プロセスが説明されると、その次に問題となるのが侵食・堆積プロセスがもたらす地形変化の速度の説明である（たとえば、松倉，2008）。しかし、地形の変化はきわめて緩慢であり、数ヶ月や数年の計測では地形変化速度を実証することは極めて難しい。このような長期の地形変化を捉える困難さを克服するために、地形学においては種々の方法がとられてきた。その一つは数学モデルから地形変化がどのように起こるかを記述するアプローチである。すなわち、コンピュータ・シミュレーションによってほんの数分の計算で百万年を超えるような地形変化が予測できる。もう一つのアプローチは、「我々が現在見ている地形は、その発達（進化）の多様なステージ（段階）のものに相当する」と仮定することである。たとえば、一つの例をイングランド南部のドーセット付近の海岸地形で示す。この海岸には、波の侵食に対する抵抗性の異なる3種の岩石が帯状に配列している。最も海側にはジュラ紀の石灰岩（Purbeck層，Portland層），その内側に白亜紀のウールデン（非固結の粘土層），さらに内側に石灰岩の一種であるチョーク（chalk）

が分布する。現在の海岸地形は第1図のようになっており（第1図Bは、第1図Aの西方に位置する）、Stair Holeのように、ジュラ紀の石灰岩に海食洞が形成されているところ、Lulworth Coveのように円形の湾になっているところ、St. Oswalds Bayのようにチョークの崖が波に直接曝されているところもある。このような地形は波の侵食力と海岸を構成している岩石の抵抗力とによって、以下のように説明されている（たとえば、Small, 1978, pp. 423-429）。海岸線をつくっているジュラ紀の石灰岩のなかで海岸と交差する断層のあるところが侵食に弱いためそこがまず破



第1図 イングランド南部・ドーセットの海岸地形 (Small, 1978, fig.165 を一部改変)

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

られる。これが Stair Hole である (第 1 図 A)。このような地形のところで侵食が進むと (すなわち時間経過があると)、その内側の粘土層は極端に強度の弱い物質であることから、短期間に侵食され円形の湾をつくる。その状態が Lulworth Cove である (第 1 図 A)。このような地形のところで侵食が進むと (すなわち時間経過があると) Lulworth Cove のような湾が連結することにより、St. Oswalds Bay のような大きな湾が形成される (第 1 図 B)。

上記の例は、現在見られる地形の多様性を時間軸に置き換えて (といっても、ここでは相対的な新旧のみをいっている) うまく説明したものである。このように地形の空間的事例を時間系列として並べ替えることができるという仮定は、空間-時間置換 (space-time substitution, space-time transformation) と呼ばれるものである。これは、「統計力学」から拝借した概念を用いて、エルゴディック仮説 (ergodic assumption) とも呼ばれ、「ある現象の時間的系列の統計的性質が、その現象を空間的に観察して得られた一組の結果の統計的性質と基本的に同一であると仮定することに等しい」ことを援用するものである。

本稿の目的は、地形学における空間-時間置換を用いた、主に斜面発達に関するこれまでの研究例を整理し、今後のこの方面の研究についての展望を試みようとするものである。

ところで、space-time substitution, space-time transformation の訳語であるが、鈴木 (2000, p. 668) では「空間時間変換」、Harvey D. (1969) “Explanation in Geography” を訳したデイビット・ハーヴェイ (松本正美) (1979) では「時空変換」という用語が使われている。松倉 (2008) は「空間-時間置換」と表現しており、本稿でもこの訳語を用いることにする。

II 空間-時間置換の創始者： ダーウィンとデイビス

エルゴディックな推論 (ergodic reasoning) は、本質的には斉一説の概念の特別な場合である。斉一説の考えは、もちろん James Hutton によって 1788 年に最初に提案されたものである。ハuttonの基本概念は「現在は過去の鍵である」というものである。地球表面の過去の変化は、現在起こっているプロセスによって説明される。地球の歴史は、物理的・化学的法則が地質時代にわたって変化しないという仮定のもとで、現在の観察によって解読されるであろう。我々のある時間のある場所での観察が、地形変化の歴史を教えてくれるし、未来にそこで何が起こるかも教えてくれる。

「種の起源」で「進化論」を唱えたことで有名なダーウィン (C. R. Darwin: 1809-1882) は地形変化の研究においても興味深い業績をあげた。ビーグル号に乗って世界をめぐったダーウィンは、太平洋やインド洋で観察したサンゴ礁の地形にはいろいろのタイプのあることに気が付いた。それをまとめたのが 1842 年に出版された「サンゴ礁の構造と分布」という本である。ダーウィンは、その中でサンゴ礁を「裾礁」「堡礁」「環礁」の 3 つのタイプに分類した。そしてそれらの相互の関係と成因を以下のように考えた。まず最初に、ある島の周囲に裾礁が発達する。その後その島が何らかの原因で沈降した。そのとき、海面は島に対して相対的に上昇することになる。この時サンゴ礁の発達が良ければ、サンゴ礁はそれまでのサンゴ礁を土台にし上方に成長する。この時、裾礁から堡礁へと変化し、サンゴ礁は島の沖に発達する。島が堡礁の段階からさらに沈降した (相対的に海面は上昇する) とすると、島はいずれ海面下になる。サンゴ礁は堡礁を土台に上方に成長するので、ドーナツ状の環礁ができあがる。つまりダーウィンは、裾礁から堡礁、環礁へと時間的に

変化していくと考え、地理的（空間的）に分布しているサンゴ礁地形を時間軸に並べ替えた。すなわち、これが空間－時間置換の典型的な応用例である。ダーウィンのこの考えは、戦後マーシャル群島での環礁のボーリングによって確かめられた。すなわち 1947 年のビキニ島でのボーリングによると 779 m まで掘り進んでもなお厚い石灰岩であった。エニウェトク島のボーリングでは 1411 m まで掘り進んでやっと島の地質（火山岩）に到達した。ボーリングコアを詳しく分析すると、これらの石灰岩は全体として浅い海に堆積したサンゴ礁であり、最も下部の石灰岩の年代は 4000 万年よりも古いことがわかった。すなわち、これらの特徴は、環礁はサンゴ礁の島が徐々に沈降してゆき、その上方にサンゴ礁が成長して厚い堆積物（石灰岩）が形成されたとするダーウィンの説を支持している。

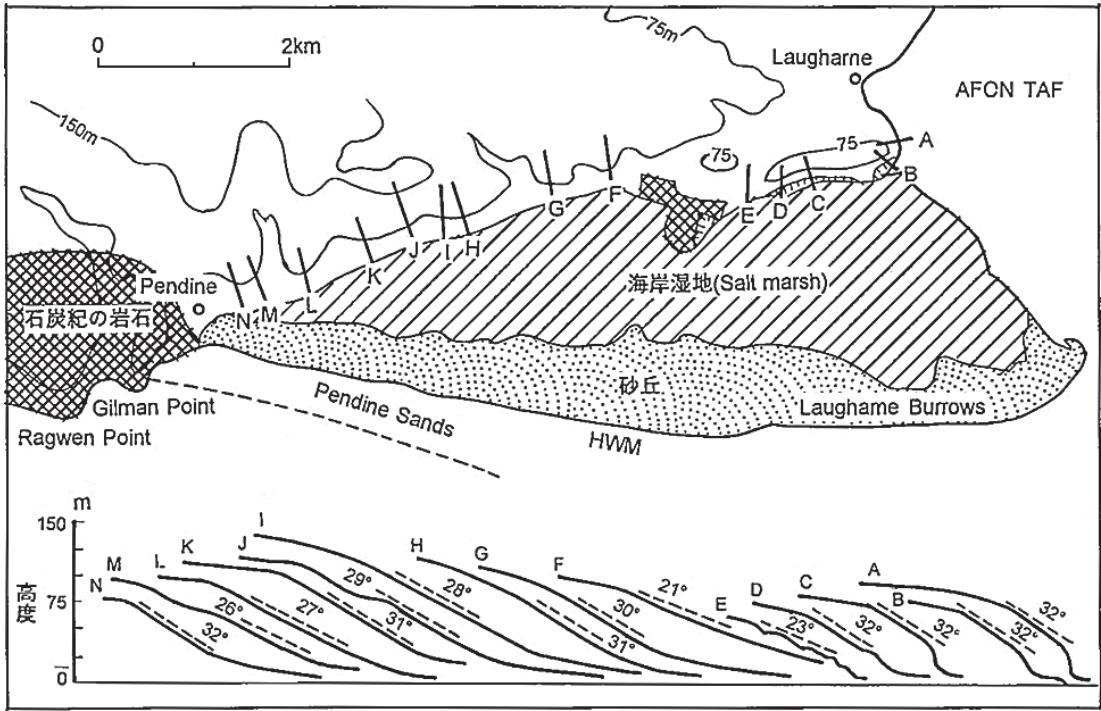
ダーウィンの方法論に影響されて、デイビス (W. M. Davis: 1850-1934) は、1912 年に侵食輪廻説を発表した。侵食輪廻説は、(1) 構造（地形の素材となる地殻表層部の性状：単斜構造、褶曲構造、あるいはそれらを構成する岩石など）、(2) 作用（地表に働くさまざまな風化・侵食作用）、(3) 時間、の 3 要素を柱として組み立てられた。風化・侵食作用による地形の変化は、時間とともに進行するが、その速さは地形変化の進行に従い変化する。また、その速さは構造や作用の違いによっても異なる。従って、地形変化の段階を経過した時間の長さだけで示すことはできない。そこで地形変化の段階を示すために、ステージ（時期）という相対的な時間の概念を導入し、人間の生涯になぞらえて、これを幼年期・壮年期・老年期などの時期に区分した。もちろん、このようなステージ区分の背景には、空間－時間置換の考えのあることは論を待たない。ただし厳密にいうと、「デイビスのとった手法は、現存する多種多様な地形の中に時系列を発見し、それにもとづいて地形変化の過程を導くという帰納的方法ではなく、

ある前提条件の下に地形変化の過程を推論し、その結果を用いて現存する地形を時系列化して説明するという演繹的方法であった（吉川、1985, pp. 28-29）」ということになる。

ここで、デイビスに関連した研究として、谷津 (1950) による空間－時間置換を用いた研究例を述べておこう。河川による侵食の場合、山地の周縁から開析が進むと考えてよい。このような考えをもとに、谷津 (1950) は満壮年期以降の侵食ステージにある秩父山地における起伏量と谷密度の関係を吟味した。その結果、谷密度の増加とともに起伏量が指数関数的に減少し、多谷小起伏になることを示した。このことは、「侵食輪廻において老年期になるにつれて、起伏量が減少し、谷密度がしだいに小さくなる」というデイビス流の概念が誤りであることを示したものである。

III Savigear (1952) の研究

前章で述べたダーウィンやデイビスのモデルが、完全に定性的演繹モデルであるとすれば、以下のモデルは定性的推論モデルと呼ばれるべきものである。このモデルは、斜面発達が遅く、直接観察・直接観測ができないという問題点を、空間－時間置換によって克服したものである。すなわち、空間－時間置換の手法が単純に適用された斜面地形研究の例として、Savigear (1952) の研究（第 2 図）が有名である。南ウエールズの Pendine では、近くの Gilman Point から東に向かって延びていく砂州によって、デボン紀の砂岩からなる海食崖は海岸から徐々に隔離されている。西側の海食崖は、砂州が最初に形成されたときに海岸から隔離され、東側の崖は未だに波の攻撃（波による侵食作用）を受け、崖の基部は崖物質の除去が起こっている。したがって、昔の海食崖のラインに沿って計測した東西方向での海食崖斜面のプロファイルのセットは時間的連続性を示すと考えられることになる。



第2図 イギリス南ウェールズのPendineにおける湿地の成長に伴う海食崖基部の保護がその後の斜面発達をコントロールする例 (Savigear, 1952)

その後、Savigear (1952) の研究は、Kirkby (1984) によるコンピュータ・シミュレーションによって検証された。Kirkby の斜面発達の数学モデルは、土壤匍行やソリフラクション、雨洗、地すべりなどのプロセスを取り込んだものである。得られた結論は以下の3つに集約される：(1) 西側の斜面から波の攻撃が減るので、崖下に崖錐が形成されるが、垂直な崖は5000年間は生存する。(2) 上部の存在する上に凸の斜面は、土壤匍行やソリフラクションの影響によって緩速度で形成される。このような上に凸な斜面の形成には少なくとも10万年が必要である。それゆえ、垂直な崖はかなり古い斜面を侵食したものである。(3) 西側の斜面(斜面F-N)では、削剥された垂直な崖の痕跡は何も残っておらず、崖線はかなり以前(後氷期の始め)に海岸侵食から放棄されたに違いない。これらの斜面の形状は、削剥され

た崖線よりは現在内陸側に見られる谷壁斜面に似ている。このKirkbyモデルはSavigearの説明を大まかには支持するものであり、この海岸線上の斜面変化が空間-時間置換が充分問題なく使用できる例の一つであることを示している。

IV 時間-空間置換を援用した斜面地形に関する研究例

ダーウィンのサンゴ礁の沈降説、デイビスの侵食輪廻説、Savigear (1952) の斜面発達ともに、時間軸上での議論はしているものの、その時間軸は相対的な新旧を示しているだけである。このように地形学における初期の研究では相対的時間軸での議論がほとんどである。その一つの原因としては、特に斜面地形のような侵食地形においては、侵食された物質が除去されるため絶対年代を計測

する試料が得にくいということがある。そのような不利を克服するために、種々の方法が考案され利用されてきており、最近では時間軸に絶対時間の入った研究もいくつか見られるようになってきた。本章では、それらの研究を時間軸が相対時間の研究と絶対時間の研究とに分けて整理する。

1. 時間軸が相対時間の研究例

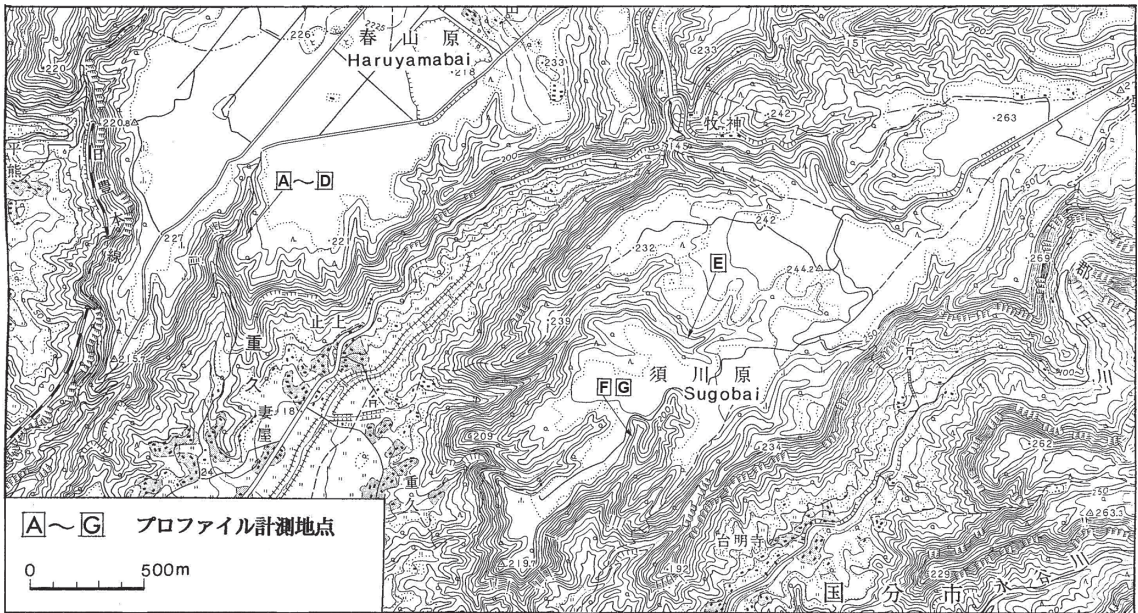
前述したように、Savigear (1952) の研究では、時間軸は相対的なものである(ただし、同じ Savigear (1952) の研究を用いて、Kirkby (1984) はある仮定のもとで時間軸の絶対値を推定している)。Carter and Chorley (1961) は、流域内のすべての流路の次数が流路網の拡大にともなって大きくなるという一般的な傾向があり、流路の次数がその谷壁斜面の相対年代を示すことができると仮定(空間-時間置換)した。この仮定をもとに、次数6までの流路次数とそれぞれの次数の流路の谷壁斜面の最大傾斜をプロットし、流路が下刻されていく過程で谷壁斜面が安息角に近い限界傾斜に達するまで急になっていくことを示唆した。

また、開析谷の上流ほど開析があとから開始するので開析度が小さい、すなわち下流の谷壁斜面ほど斜面が形成されてからの時間が長い(上流下流という空間分布を、相対的時間の新旧に置き換えるという空間-時間置換)、ということを利用した研究がいくつかある(Palmer, 1956; Pallister, 1956; Ollier and Tuddenham, 1962; Pain, 1986)。たとえば、Palmer (1956) は北東ヨークシャーのケスタを切る開析谷において、キャップロック上でのトアの形成と谷壁斜面の発達過程について議論している。また、Ollier and Tuddenham (1962) は南オーストラリアにおけるデュリクラストのキャップロックの下の斜面発達とキャップが侵食されてしまった斜面の発達とを比較した。キャップロックのデュリクラストが存在する場合は、それが全体としての斜面後退をコントロールし平行後退する。しかし、いったんデュリクラ

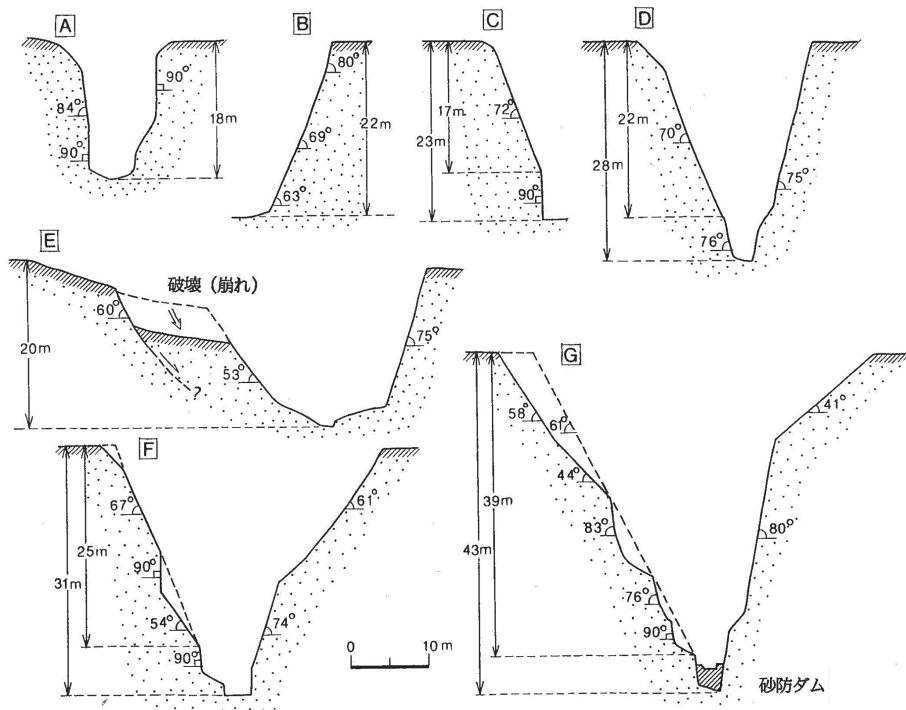
ストが取り除かれると、その下の軟岩の勾配は急激に減少する。Pallister (1956) は Buganda における斜面発達について同様の議論をした。また、Pain (1986) は、相対的年代に彼の斜面を置き換えるために、東ニューサウスウェールズにある流域の発達に関する事実を用いた。彼の調査地域においては、砂岩のキャップロックは頁岩の上ののっており、状況はデュリクラストのキャップロックのつくる地形にアナロジーされる。前述した Ollier and Tuddenham (1962) と同様に、キャップロックが残っている間は平行後退(slope retreat)と斜面の交代(置き換わり:slope replacement)が起こり、いったんキャップロックが取り除かれた時は斜面の交代と減傾斜(slope decline)が起こることを議論した。

Matsukura (1987) は、上記と同様の仮定のもとに、シラス台地の解析過程における谷壁斜面の変化過程を以下のように議論した。鹿児島県・霧島市(旧・国分市)周辺のシラス台地の最上部は、約2.9万年前に噴出したとされる入戸火砕流堆積物(以下、単にシラスと呼ぶ)より構成されている。たとえば、春山原や須川原などのシラス台地の縁は、小さな支流の開析谷によって刻まれている(第3図)。2.9万年前にシラスが堆積した直後には、一面に平坦な平原が形成されたと考えられる。そこに下流から河川による侵食がはじまる。河川は下刻と同時に谷頭侵食をして上流方向に流路を延ばしていく。従って、開析谷は上流ほど若く(谷壁の高さも小さく)、下流ほど古い(谷壁の高さは高い)ということになる。すなわち、上流にある(高さの低い)谷壁斜面は新しく、下流にある(高さの高い)谷壁斜面は古いことになるので、それらを時間軸に並べ替えることができるということになる。

これらの開析谷の横断形を計測し、それらを第4図に示した。谷壁の高さの順に番号(アルファベット)をつけて並べてあるが、これらの形状の特徴は以下のようにまとめられる:



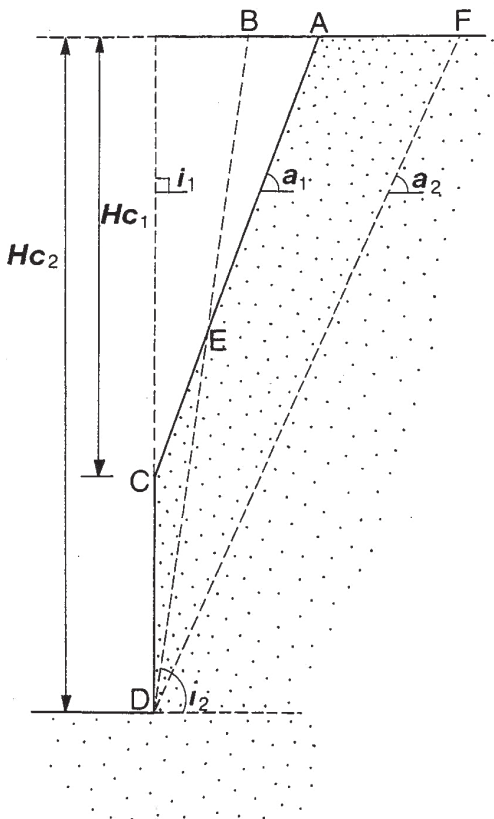
第3図 鹿児島県霧島市（旧・国分市）付近のシラス台地の谷壁プロファイルの計測地点 (Matsukura, 1987)



第4図 シラス台地開析谷の谷壁プロファイルのいくつかの例 (Matsukura, 1987)

- (1) 開析谷の谷頭には、垂直な谷壁をもつガリーが発達している（第4図の Profile A）。
- (2) ガリー壁の多くのプロファイルは直線のセグメントからなっている。たとえば、Profile B や Profile E の右岸などは単一の直線セグメントからなり、Profile C, D, F, G などには複数の直線セグメントからなっている。
- (3) Profile C, D, F, G に見られるように、プロファイルの下部は急である（ほぼ垂直）。

Profile E の場所では、小さな段丘状の地形が谷壁に沿って上・下流方向に長さ 30 m ほど延びている。この段は、周囲の地形観察等から破壊面が 60° の「平面破壊」(第5図に示したような破壊)の結果形成されたものと考えられる。これは 50 m ほど下流にある多量の堆砂をもつ砂防ダムの



第5図 下刻が垂直に進行する場合の平面破壊 (Matsukura, 1987)

影響で、崩れのブロックが流水に運搬されにくい。ため残存したもののものであった。また、Profile B, C, D の直線部は、平面破壊によって形成されたせん断面と思われる。以上のような観察から、ここでは、垂直な下刻と平面破壊という2つの削剥プロセスが示唆される。

上記のような削剥プロセスをもとに、以下のような条件を考慮してモデルを作成する。その条件とは：

- (1) 最初に、下刻が垂直に進行する。そして、
- (2) 谷壁の高さが限界自立高さに到達した瞬間に、くさびの形状をもつように、のり先を通る平面破壊（崖崩れ）が起こる。そして、
- (3) 谷底に堆積した崩れの物質を、流水が速やかに運搬除去し、さらに谷底を垂直に下刻する。

このようなモデルの解析には Culmann の解析を適用するのが妥当と思われる。そこで、シラスの物性値（自然含水比状態の値で、 $c = 0.61 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi = 49^\circ$, $\gamma = 1.1 \text{ gf/cm}^3$ ）を、限界自立高さと崩壊面勾配を Culmann の式に代入して計算すると、 $H_{c1} = 15.6 \text{ m}$, $\alpha_1 = 69.5^\circ$ （それぞれの下付き添字の1は、1回目の崩壊を表す）となった。すなわち、シラスの垂直な谷壁は 15.6 m の高さまでしか自立できないことがわかる。シラスの垂直な谷壁は、この高さに達すると斜面は不安定となり、 70° のせん断面をもつ崩れが起こる。最初の崩れが起こったあとに、流水が崩れの物質を運搬除去したのち、再び下刻に転じ、谷壁下部に垂直な部分が付け加わることになる。したがって、下刻が進行するに従い、谷壁斜面の平均勾配は 70° から徐々に増加することになり、徐々に不安定性を増す。谷壁の高さが $H_{c2} = 24 \text{ m}$ になったときに2回目の崩れが起こることになる。下刻がシラスの下部の熔結部に到達するまで、垂直な下刻とそれに続く崩れが起こると仮定し、同様の解析を繰り返す。谷壁の高さが 70 m に達するまでには、合計6回の崩れが起こる。以上のような解析

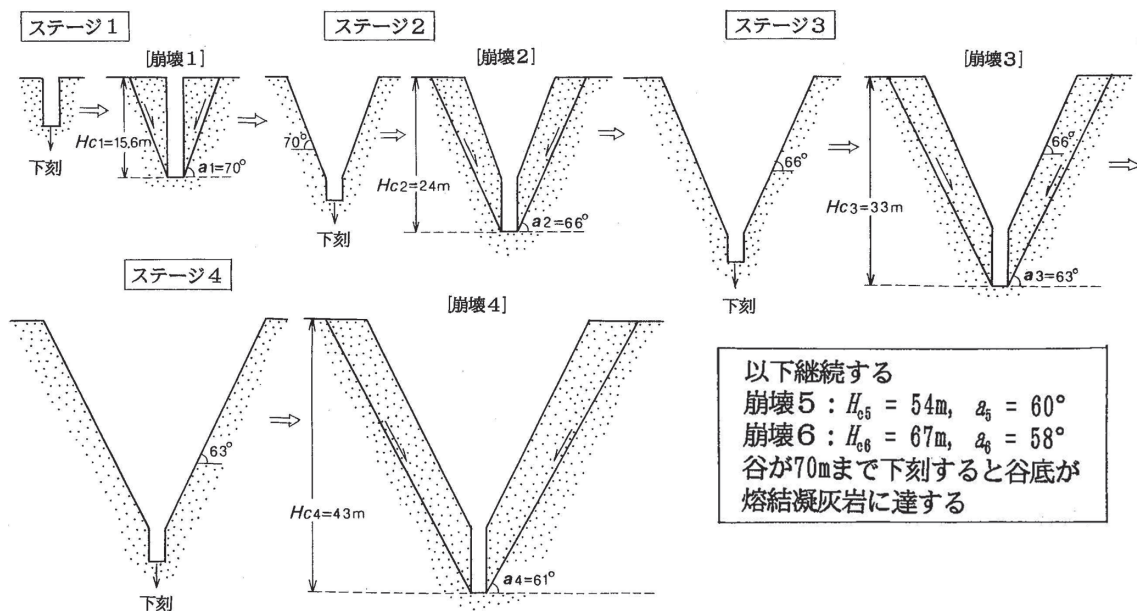
をもとに、シラス台地における谷壁斜面の発達過程をモデル化したのが第6図である。このモデルと第4図に示した現実の谷壁プロファイルと比較してみる。Profile A, Bはステージ1に相当する。Profile Bは、モデルの最初の崩れが起こった直後に相当すると思われる。すなわち、谷壁の高さはモデルより若干高いが、斜面勾配の 69° はモデルの最初の崩れの 70° に極めて近い。Profile CやDは、モデルのステージ2のプロファイルに似ている。また、Profile FやGはモデルのステージ3, 4のプロファイルに似ている。このように、上記のモデルで谷壁斜面の発達過程をうまく説明できる。以上のように、シラス台地の発達モデルは、下刻により谷壁が高くなるにしたがい、谷壁で崩壊が起こり徐々に減傾斜していることを示している。

2. 時間軸が絶対時間の研究例

時間軸に絶対時間が入った最初の研究は、Brunsdan and Kesel (1973) によって行われた。

彼らは、古地図や空中写真などの情報から120年間にわたる河川の蛇行変遷を読み取り、河岸の崖の斜面発達を議論した。ミシシッピ下流部において、河川蛇行が徐々に下流側にシフトしていく過程で、河岸が流水の侵食から放棄される場所も徐々に下流側にシフトしていくことを利用して、河岸の崖斜面の120年間にわたる変化を追跡した。現在流水が河岸の足許を直接侵食している場所は high intensity zone, 現在は通常の水位では崖の足許は侵食されないが、水位が上がる洪水時には崖の下部の侵食が起こる場所は intermediate intensity zone, 流水の侵食から放棄された場所は low intensity zone と読んでいる。崖の平均勾配は120年で 45° から 20° まで低下している。

発生年代が既知の断層による断層崖の斜面変化を追った研究がいくつかある。この分野の研究の先駆けはWallace (1977) である。彼は、ネバダ州の断層崖の100万年間の斜面発達を議論している。この地域の断層は未固結の砂礫を切った正断層が多く、形成直後の斜面勾配は約 60° である。そこ



第6図 シラス台地における、下刻に伴う谷壁斜面発達モデル (Matsukura, 1987)

で、1915年や1954年の大地震によって形成された断層崖および15000年前に形成された湖成段丘の段丘崖の斜面勾配を計測し、それらを空間-時間置換し時系列に並べた（ここでは当然、地震直後の断層崖と離水直後の湖成段丘の勾配は等しいと仮定している）。その結果、地震直後に60°の勾配をもつ断層崖（露岩面：free face）は、100年後には勾配30°程度の崖錐斜面だけとなり、数千年から1万年後にはそれも失われて勾配20°以下の小扇状地面に変わること示した。同様に、Sterr (1985)によって、1.5万年間におけるユタ州の断層崖のプロファイル変化が議論され、断層崖は全体的に徐々に緩傾斜化し、崖の肩が丸くなっていくことが示されている。

日本からニュージーランドにかけての変動帯においては、段丘編年研究の進展がめざましく、それらの年代値を利用した研究が行われている。以下の例は、河成段丘の離水年代と初期地形の両方が推定できることをうまく利用したものである。たとえば、野上 (1977) は、十勝平野歴舟川流域に分布する年代既知の河成段丘を用い、その段丘崖の10万年にわたる斜面形態の変化を追っている。その結果、上部凸部斜面は最終氷期の周氷河気候下で活発であった土壤匍行によって形成されたこと、斜面中央部の直線部は10万年にわたって徐々に緩傾斜化してきていることなどが議論された。同様に段丘崖の斜面形態の変化と勾配の時間的変化を説明したものとして、Suzuki and Nakanishi (1990), Suzuki *et al.* (1991) がある。たとえば、Suzuki and Nakanishi (1990) は、秩父盆地の荒川本流沿岸に発達する河成段丘崖のプロファイルを152地点で測量した。段丘のほとんどが岩石段丘で、その段丘崖の離水年代（段丘崖基部に接する下位の段丘面の形成年代にほぼ等しいと仮定：500年から3万年前）によって16系統に区分される。各種の変数を野外および室内で計測した結果、段丘崖の勾配は以下の式のように表されることを述べている：

$$\theta = \alpha \left[\frac{T}{H} \cdot \frac{P\rho w}{I_r S_c I_d} \right]^{-\beta} \quad (1)$$

ここで、 θ は段丘崖の勾配、 T は段丘崖の離水年代（削剥年数、ka）、 H は段丘崖の比高（m）、 P は平均年降水量（mm/y）、 ρ は斜面発達に参与して運搬される物質の平均単位体積重量（gf/cm³）、 w は段丘崖上の単位幅（m）、 I_r は基盤岩石の有効相対傾斜示数（無次元）、 S_c は基盤岩石の湿潤圧縮強度（MPa）、 I_d は基盤岩石の不連続示数、 α と β は無次元の定数である。

任意の T における段丘崖各部および全体の減傾斜速度は、 P, ρ, I_d の時間的変化を無視しうると仮定すると、式 (1) を時間 T について微分することにより、

$$\frac{d\theta}{dT} = -\alpha\beta \left[\frac{P\rho w}{HI_r S_c I_d} \right]^{-\beta} T^{-(\beta+1)} \quad (2)$$

となる。この式は、勾配の変化速度が、減傾斜させる侵食力の各要素（降水量がその代表）とそれに対する抵抗力（段丘崖構成物質の強度や段丘崖の高さなどがその代表）の比によって表されることを示している。

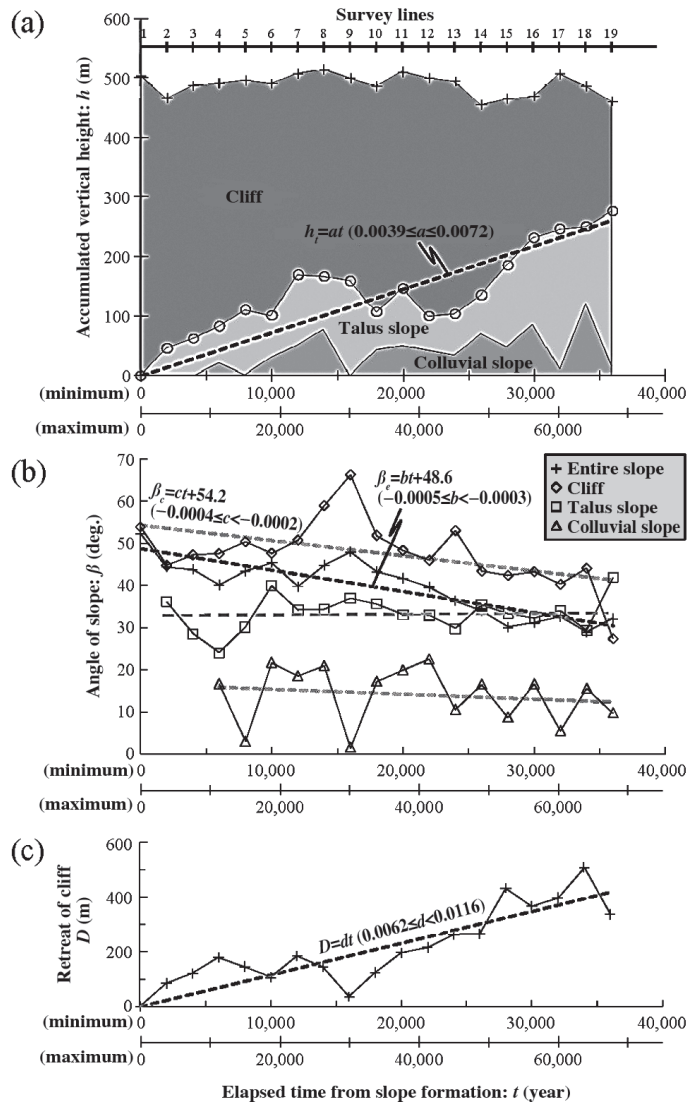
海成段丘を用いて、その段丘崖の変化を追った研究もある (Dunkerley, 1980; Crittenden and Muhs, 1986)。たとえば、Dunkerley (1980) は、パプア・ニューギニアにおける12.5万年前から27.7万年前までに離水した海成段丘の離水後の段丘崖の斜面形態の変化を追っている。同様に、Crittenden and Muhs (1986) は、カリフォルニアのサンタクレメント島に発達する12.7万年前から90万年前に離水した海成段丘の段丘崖の時間的変化を追跡し、最初の20万年間の減傾斜速度が大きいことを見出している。

絶対年代を得る方法としては、人工地形を利用することもある。たとえば、Goodmann and Haigh (1981) は、石炭の採掘場周辺で、60年前

と30年前に形成されたボタ山の斜面プロファイルを現在のボタ山の斜面プロファイルと比較した(すなわち、60年間の斜面プロファイルの変化過程が追跡された)。その結果、斜面上部が削られ下部に堆積することから斜面は全体的に緩傾斜に変化していることを示している。

最近、Obanawa *et al.* (2009) は、富山県、称

名川沿いの側壁斜面において、過去約4万年間における崖錐地形の発達速度を以下のように推定した。称名川は、立山起源の溶結凝灰岩台地が称名滝によって開析された谷を流れている。したがって、称名川沿いの側壁斜面は、滝に近いほど新しく(地形形成時間が短い)、滝から遠いほど古い(地形形成時間が長い)地形であると考えら



第7図 富山・称名滝の下流部における谷壁斜面の変化(滝の後退速度をもとに、19測線の谷壁斜面をそれぞれの形成開始から現在までの時間軸に置き換えている): (1)露岩面、崖錐および崩積土斜面の高さの変化; (2)露岩面、崖錐および崩積土斜面の勾配変化; (3)谷壁頂部の後退距離の時間的变化 (Obanawa *et al.*, 2009)

れ、斜面の縦断形を川の上流から下流に向けて並べることで、地形変化を推定することができる（空間-時間変換が可能）。また、Hayakawa *et al.* (2008) により称名滝の形成直後の滝の位置と形成時期がわかっており、それらのデータをもとにその後の滝の後退速度が約 15 cm/year であることが推定されている。これらの情報をもとに、開析谷壁の各位置ごとに崖が形成された時期（すなわち各谷壁の形成初期から現在までの地形変化継続時間）を求めることが可能となる。したがって、それらを時系列に並べることで、谷壁斜面の地形変化速度を計算することができる。このような背景をもとに、称名滝から約 300 m 間隔で左岸斜面の縦断形を 19 本計測した。次に、計測した縦断形を傾斜変換点をもとに、崩積土斜面 (colluvium)・崖錐 (talus)・露岩面 (cliff: free face)・上面斜面の 4 つの斜面に区分し、各斜面の比高・傾斜角の経時変化を求めた (第 7 図)。その結果、崖錐斜面の比高は経時的に増加しており、崖錐の比高 (m) = 7.2 mm × 経過時間 (年) という直線近似で表された (相関係数 0.82)。すなわち、崖錐の上方への成長速度は 7.2 mm/year であった。また、崖の傾斜角は経時的に減少しており、露岩面の傾斜角 (deg.) = - 0.4 deg. × 経過時間 (年) + 54.2 という直線近似で表された (相関係数 0.51)。すなわち、露岩面の減傾斜後退速度は 0.4 deg/year であった。さらに、現在の河床の中心をかつての滝の中心と仮定して、露岩面頂部 (崖頂部と呼ぶ) の後退量 (河床の中心から露岩面頂部までの水平距離) の経時変化を求めたところ、崖頂部の後退量 (崖頂部の水平後退距離) = 11.6 mm × 経過時間 (年) という直線近似で表された (相関係数 0.86)。すなわち、崖頂部の後退速度は 11.6 mm/year であった。

V おわりに

以上、空間-時間置換の手法を用いた斜面発

達の研究についてレビューしたが、この手法を使うには種々の困難がつきまとう (たとえば、Chorley *et al.*, 1984, pp. 32-33; Burt and Goudie, 1994) とともに、使用にあたっては注意しなければならないこともある。最も基本的にやってはいけない間違いとしては、そこにある空間的なバリエーションが単に平均的なものからの変化形であるものを、時間的な連続性が存在すると仮定してしまうことである。すべての地形が発達の連続性として並べられる訳でもないし、ある地域のすべての地形が同じ発達段階を通る訳でもない。地形物質やプロセスの空間的バリエーションの方が地形発達のステージの重要性を上まわることがあるかもしれない。そこで、我々は空間-時間置換の仮定を使用する場合には十分な注意を払わなければならない。それにもかかわらず、現在の地形と個々の地形の時間変化との間に何も関係がないというのも不条理である。更に言えば、上に紹介した例のように、地形学におけるアイデアの幾つかは空間的变化から発見されたものであり、それらは充分時間的变化を表していることを示している。

最後に、用語の問題を指摘しておこう。地形学で取り上げられている多くの研究は確率概念を含んだ統計的扱いをしている訳ではない。従って本稿で紹介したような研究例を「ergodic」という用語で引用するのは誤用であるという指摘がある (Paine, 1985)。また、「space-time substitution」という用語も広く使われてきているが、この用語も厳密には統計的データの採取計画にかかわるものであり、それに変わる用語が必要かもしれない。Thornes and Brunnsden (1977, p. 25) は「space-time substitution」の誤用を指摘するとともに、「space-time analogue」という用語を提案している。しかし、Paine (1985) によれば、この用語も space と time の交換を意味してはいるものの厳密性に欠けるとして、「location-for-time substitution」という用語が望ましいと主張して

いる。この手法の研究例の増加と共に、適切な用語統一が望まれる。

文献

- 鈴木隆介 (2000): 「建設技術者のための地形図読 図入門, 第3巻: 段丘・丘陵・山地」古今書 院, 555-942.
- デイビット・ハーヴェイ (松本正美訳) (1979): 「地理学基礎論: 地理学における説明」古今 書院, 352p.
- 野上道男 (1977): 比較形態学的方法による段丘 崖斜面発達の研究, 地理学評論, **50**, 32-44.
- 松倉公憲 (2008): 「地形変化の科学: 風化と侵食」 朝倉書店, 242p.
- 谷津榮壽 (1950): 秩父山地の起伏量について. 田中啓爾先生記念大塚地理学会論文集, 323-331.
- 吉川虎雄 (1985): 「湿潤変動帯の地形学」東京大 学出版会, 132p.
- Brunsdon, D. and Kesel, R. H. (1973): Slope development on a Mississippi River bluff in historic time. *Journal of Geology*, **81**, 576-597.
- Burt, T. and Goudie, A. (1994): Timing shape and shaping time. *Geography Review*, **8**, 25-29.
- Carter, C. S. and Chorley, R. J. (1961): Early slope development in an expanding stream system. *Geological Magazine*, **98**, 117-130.
- Chorley, R. J., Schumm, S. A. and Sugden, D. E. (1984): *Geomorphology*, Methuen, New York, 605p.
- Crittenden, R. and Muhs, D. R. (1986): Cliff-height and slope-angle relationships in a chronosequence of Quaternary marine terraces, San Clemente Island, California. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., **30**, 291-301.
- Dunkerley, D. L. (1980): The study of the evolution of slope form over long periods of time: a review of methodologies and some new observational data from Papua New Guinea. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., **24**, 52-67.
- Goodman, J. M. and Haigh, M. J. (1981): Slope evolution on abandoned spoil banks in eastern Oklahoma. *Physical Geography*, **2**, 160-173.
- Hayakawa, Y., Obanawa, H. and Matsukura, Y. (2008): Post-volcanic erosion rates of Shomyo Falls in Tateyama, central Japan. *Geografiska Annaler*, **90A**, 65-74.
- Kirkby, M. J. (1984): Modelling cliff development in South Wales: SAVIGEAR re-viewed. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., **28**, 405-426.
- Matsukura, Y. (1987): Evolution of valley side slopes in the "Shirasu" ignimbrite plateau. *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, **8**, 41-49.
- Obanawa, H., Hayakawa, Y. and Matsukura, Y. (2009): Estimation of retreat rates of valley-side cliff from space-time substitution along the Shomyo River in central Japan. *Geografiska Annaler* (in press)
- Ollier, C. D. and Tuddenham, W. G. (1962): Slope development at Coober Pedy, South Australia. *Journal of Geological Society of Australia*, **9**, 91-105.
- Pain, C. F. (1986): Scarp retreat and slope development near Piction, New South Wales, Australia. *Catena*, **13**, 227-239.
- Paine, A. D. M. (1985): 'Ergodic' reasoning in geomorphology: time for a review of the term? *Progress in Physical Geography*, **9**, 1-15.
- Pallister, J. W. (1956): Slope development in Buganda. *Geographical Journal*, **122**, 80-87.

- Palmer, J. (1956): Tor formation at the Bridestones in north-east Yorkshire and its significance in relation to problems of valley-side development and regional glaciation. *Transactions of the Institute of British Geographers*, **22**, 55-71.
- Savigear, R. A. G. (1952): Some observations on slope development in South Wales. *Institute of British Geographers, Transactions*, **18**, 31-51.
- Small, R. J. (1978): *The Study of Landforms: A Textbook of Geomorphology* (Second ed.), Cambridge University Press, Cambridge, 502p.
- Sterr, H. (1985): Rates of change and degradation of hillslopes formed in unconsolidated materials: a morphometric approach to date quaternary fault scarps in Western Utah; USA. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F. , **29**, 315-333.
- Suzuki, T. and Nakanishi, A. (1990): Rates of decline of fluvial terrace scarps in the Chichibu Basin, Japan. *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, **11**, 117-149.
- Suzuki, T. , Nakanishi, A. and Tsurukai, T. (1991): A quantitative empirical model of slope evolution through geologic time, inferred from changes in height-ratios and angle of segment of fluvial terrace scarps in the Chichibu Basin, Japan. *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, **12**, 319-334.
- Thornes, J. B. and Brunnsden, D. (1977): *Geomorphology and Time*. Muthuen, London, 208p.
- Wallace, R. E. (1977): Profiles and ages of young fault scarps, north-central Nevada. *Geological Society of America Bulletin*, **88**, 1267-1281.
- (2009年5月29日受付, 2009年8月18日受理)