

月山における第四紀末期の残雪凹地の
地形発達と環境変遷

荻谷愛彦

山形県月山の残雪凹地(雪窪)について最近約16,000年間の地形・景観発達を時代別にくわしく明らかにし、古地理変遷を復元した。本研究では、①大縮尺地形学図の作成とそれに基づく残雪凹地の地形面区分、②各地形面における斜面物質と被覆土層の記載、③斜面物質・被覆土層のテフラ・¹⁴C編年とそれらに基づく地形面編年、④被覆土層の花粉分析による古環境復元などの気候地形学・第四紀学的手法を用いた。

残雪凹地内とその周辺では3つの地形面(I-III)が識別できる。I面は残雪凹地の周縁に分布する凸型-直線型緩斜面である。斜面物質には浅間草津テフラ(約16,000年前)が、被覆土層には鬼界アカホヤ(約7,200年前)以降の指標テフラが介在する。本面は16,000-7,000年前におもに緩速度物質移動で形成された。植生を欠くIII面は残雪凹地の中心部を占め、明瞭な凹型断面を示す。III面を覆う土層やテフラは認められず、その形成は約2,000年前から継続している。野外実験によれば、III面には水流の浸食作用が現在働いており、年0.4mmの斜面低下が生じている。I面とIII面に挟まれるII面は明瞭な凹型斜面からなり、十和田Aテフラ(AD915年)のみを含む土層に覆われる。本面は7,000-2,000年前に水流の浸食作用で形成された。花粉分析によれば8,500-7,000年前は温暖・多雪気候が支配的だったが、約7,000-6,000年前に寒冷・少雪化し、4,500-4,000年前にその極に達したと推定される。また約4,000年前以降に気候は温暖化したが、約2,000年以後に気候悪化が再び生じた可能性が高い。以上の総合から、月山の残雪凹地の古地理変遷は次のように復元された。

1) 16,000-11,000年前、残雪凹地内外の斜面は無植被・不安定状態にあり、土層は生成しえなかった。特に残雪凹地の周縁部では厳しい周水河環境が卓越していた。一方、残雪凹地の前面には浅くて幅の広い谷が存在し、融雪水を排水していた。このことは、現在の残雪凹地の原地形である凹型斜面が最終氷期の終末、ないしそ

れ以前に存在していたことを示す。2) 約11,000年前以降、残雪凹地の周縁で地形形成作用の減衰と植生の侵入が生じ、そのような斜面が安定した。この結果、腐植質土層が生成し始めた。これは新ドリラス期末の汎地球的な気候温暖化が契機となった可能性が高い。その後、約7,000年前まで裸地は残雪凹地の周縁から中心部へ向かって縮小した。3) 約7,000年前以降の気候悪化は消雪の遅れとそれによる裸地の拡大をまねいた。裸地の拡大により残雪凹地前面部の排水路中の荷重は増し、流路の側刻が生じた。4,500-4,000年前の気候最悪化期に裸地は最も拡大した可能性が高い。4,500-4,000年前以降の気候温暖化は地形形成作用の減衰と裸地の縮小をもたらし、それによって安定した斜面で新たな土層生成が始まった。排水路中の荷重の減少によって下刻が強まり、一部の斜面は段丘化した。4) 最近約2,000年間の残雪凹地の形成領域はその中心部(すなわちIII面)に限定されてきた。花粉分析データは約2,000年前以降にも気候変化が生じた可能性を示しているが、残雪凹地中心部の裸地がこの期間に拡大・縮小した証拠はない。(環境地質部)

Keywords: snowpatch hollow, climatic geomorphology, the latest Quaternary landscape evolution, Mount Gassan

後期新生代堆積盆地縁辺部の逆断層型活構造の
形態と発達過程

小松原琢

はじめに

厚い後期新生代の堆積物が分布する地域では、地表に明瞭な断層変位地形を伴う活断層はほとんど発達しない一方で、活褶曲を主とする複数の並走する活構造によって構成される幅広い変形帯が、堆積盆地周辺に発達している例が多い。こうした変形帯の実態を解明するための基礎資料を提示することを目的に、幾つかの地域を対象として構造発達過程を検討した。

対象と方法

本研究では、堆積盆地中心部におけるグリーンタフより上位の堆積物の層厚が2,500m以上に達する、新潟・庄内・石狩の各堆積盆地の縁辺部で、活褶曲が典型的に

*平成8年4月19日本所において開催

発達する地域の、鮮新世末期以降、特に第四紀後期の構造発達過程を対象として調査を行った。調査に当たっては、並走する複数の構造の活動過程を比較すること、変位形態の変遷を明らかにすることに主眼を置いた。そのため、上部第四系の編年と変位地形の記載および上新統以上の各層の層序関係や構造を比較することにより、短波長褶曲構造の変動過程を復元することを試みた。

地域調査結果

1. 新潟平野東縁・三条市東方地域

三条市東方では、波長1-2kmの短波長褶曲からなる複背斜が発達する。このうち、複背斜の中軸部に位置する背斜が最初に活動を開始し、順に平野側の背斜が活動を始めるようになった。その間数十万年間にわたって複数の背斜が共に活動している。このような構造運動場所の平野側への移動は、新潟平野中心部の急激な沈降に伴って生じている。また、これらのうち最も平野側に位置する新期の背斜では、段丘基盤をなす鮮新-更新統の構造と比較して最終間水期以降の段丘面は、平野側翼部の限られた場所でのみ急傾斜する傾向を示す。こうした変位形態の変化、すなわち背斜翼部における傾動運動の局所化は特に新期の構造で明瞭といえる。

2. 庄内平野北部東縁地域

庄内平野北部東縁では、波長2-5km程度の3本の逆断層を伴う背斜が並走する。これら3つの背斜は、山地側に当たる東側の構造から活動を開始し、西側の構造ほど新しい時代に活動を開始した。このような構造運動場所の平野側への移動は、庄内平野の急激な沈降に伴って生じている。また、新期の背斜では、最終間水期の段丘面の変形から知られる背斜軸は中部更新統の背斜軸の平野寄りに位置すると同時に、中部更新統の構造に比べて平野側の翼部のみが急傾斜する非対称な形態を示す。さらに、第四紀後期の2段の段丘面を比較すると新期の段丘面の方が、背斜翼部における傾動運動の局所化が進んでいる。

3. 石狩平野中部西縁

石狩平野中部西縁には、波長8-10kmの3本の背斜が並走する。これらは、後背地側の背斜から順に活動を開始し、第四紀後期には平野側の構造ほど活動度が大きくなったと考えられる。この間、数値十-百万年以上にわたって複数の構造が共に活動している。また、新第三系の構造と第四紀後期の変位地形を比較すると、第四紀後期における平野側翼部の傾動運動の局所化と平野側の翼が急傾斜する非対称化、および背斜軸の平野側への移動という、変位形態の変化が認められる。

地域調査結果のまとめ

以上より、調査地域の構造発達過程には以下の共通する特徴が認められるといえることができる。

1. 複数の構造を比較すると、後背地側の構造から順に活動を始め、順に平野側の構造が活動を開始している。
2. 上記の過程で、数十万年間にわたって複数の構造が共に活動を行っている。
3. 特に新期の背斜では、背斜翼部における傾動運動の局所化や背斜形態の非対称化、背斜軸の平野側翼部への移動といった変位形態の変化が認められた。

(環境地質部)

Keywords : active fold, structural evolution, Late Cenozoic sedimentary basin,

地すべりの規模・頻度分布特性

須貝俊彦

斜面災害発生ポテンシャルの評価、および、山地の削剥過程におけるマスマーブメントの役割の理解を目的として、多種の地質からなる赤石山地において、地すべりの規模別頻度分布特性を、地質ごと、高度帯ごとに検討した。地すべり運動の単位地形である地すべり土塊を空中写真判読と現地調査によって認定し、個々の土塊の面積、長さ、比高、分布高度を2万5千分の1地形図上で計測した。対象とした土塊は総数で約3,500である。これらの土塊の大半は、現在安定しており、滑動記録が知られていない“古期地すべり”であるが、地震動などが引き金となって再滑動する恐れのあるものである。

地すべり土塊の累積個数と面積との関係は、一般に指数分布： $N(x) = 10^a 10^{-bx}$ あるいは、 $\log_{10} N(x) = a - bx$ 、等で表される。ここで $N(x)$ は x と等しいかそれ以上の規模の地すべり土塊の累積個数を、 x は地すべり土塊の面積 A の対数値($\log_{10} A$)で表される規模を示し、 a と b は定数である。 a の値は降雨強度などの誘因を反映し、 b の値が地質や地形条件などの素因を反映する。 b の値は数理的には地すべりの規模の増大にともなう頻度の減少の割合を意味し、その値の違いは「地形形成に対する地すべりの効果(影響力)の大小」を示す。 b の値は土塊の位置する地質および高度によって異なる値を示す。高度は起伏(斜面長)・傾斜等の地形条件の総合的な指標である高度分散量と強い相関関係を示し、地形場の条件を示していると考えられる。 b の値は、すべての地質、及び、すべての高度帯に対して、1よりも大きな値を

とり、地質ごとにみた場合、全地すべり土塊面積に対する規模別の面積の割合は規模が大きくなるほど急激に減少することを示す。すなわち、面積に関しては、小規模で高頻度の地すべり土塊ほど効果的であると言える。

地形変化に対する効果という点では、地すべり土塊の体積規模が重要である。土塊の体積は、土塊面積に平均土塊厚を乗じることにより、以下のように近似した。平均土塊厚は、すべり面の縦断方向の断面と、土塊の地表面の縦断方向の断面とをそれぞれべき関数で回帰し、両者に挟まれた部分の厚さの平均値で代表させた。平均土塊厚は、土塊の上端と下端との比高 h の $1/3$ 程度となる。他方、土塊の比高 h は土塊面積 A のべき関数： $h = CA^d$ で表されるので、土塊の面積 $V = (1/3)hA = (1/3)cA^{d+1} = (1/3)c10^{(1+d)x}$ で近似される。ここで、 c と d は定数である。規模 x の土塊数を $n(x)$ とすれば、 $n(x) = a'10^{-bx}$ と表されるので、規模 x の土塊の合計体積 $g_v(x)$ は、 $g_v(x) = n(x) = a''10^{(1+d)-bx}$ となる。ここで、 $a'' = (1/3)a'c = (1/3)bc10^a \log_e 10$ (定数 > 0) である。 $b < 1+d$ のとき、 $g_v(x)$ は単調増加となり、大規模・低頻度の地すべりが効果的であることを示す。逆に、 $b > 1+d$ であれば、小規模・高頻度の地すべりが効果的ということになる。 b の値と $1+d$ の値とを地質別、高度帯別に比較すると、いずれの地質に対しても、海拔高度 800 m 以下の小起伏な高度帯では小規模・高頻度の地すべりが効果的であり、高度 1,600 m 以上の大起伏な高度帯では大規模・低頻度の地すべりが効果的であることを示す。このことは、地すべりの最大規模が起伏(斜面長)に規定されていて、高度が高く起伏の大きい場所では、大規模地すべりが発生しやすくなることを示す。小規模・高頻度の地すべりが効果的であるか、大規模・低頻度の地すべりが効果的であるかの境界高度は、800 m から 1,600 m の間で、地質によって異なる。

(環境地質部)

Keywords: landslide mass, magnitude-frequency distribution, geological condition, altitudinal condition,

青海石灰岩石炭系の堆積相と造礁生物の変遷

中澤 努

青海石灰岩は秋吉、阿哲、帝釈石灰岩などととも秋吉帯を特徴づける石灰岩として知られている。これらの石灰岩は世界的にも珍しい海山起源であるにもかかわらず

らず、堆積学的見地からの研究は太田 (1968) のほか数編があるにすぎない。筆者は青海石灰岩の生物相と堆積相から堆積環境を復元し、青海石灰岩の形成史を明らかにする目的で研究を進めているが、今までに本石灰岩石炭系の各所にさまざまな原地性礁性石灰岩 (boundstone) を確認した。今回は、それらをもとに石炭紀の造礁生物の変遷とそれに伴う堆積相の多様性について述べる。

調査地域は電気化学工業(株)青海鮎山周辺と明星セメント(株)前山切羽で、下部-中部石炭系が分布している。時間面の設定には有孔虫類の生層序を用い、本地域に *Medicris breviscula* 帯から *Beedeina* sp. 帯までの 8 化石帯を認定した。同時にそれらの国際的な対比も行った。

各化石帯において石灰岩の堆積相は変化に富んでいる。調査地域の北東部には級化層理と珪質岩の挟んで特徴づけられる fore-reef 堆積物が分布している。その南西側には針状の submarine cement を持つ礫質石灰岩 (rudstone) と原地性礁性石灰岩、淘汰が良く円磨度が高い back-reef sand が分布している。このうち fore-reef 堆積物は、長谷ほか (1974) が帝釈石灰岩から報告した周縁相に相当する。一方、原地性礁性石灰岩などの極浅海性堆積物は秋吉石灰岩から太田 (1968) などによって報告されている。青海石灰岩では両者が同一時間面に観察できることから、これらが一つの生物礁を起源とした一連の堆積物であることを教えてくれる。

青海石灰岩には秋吉石灰岩と同様に多くの原地性礁性石灰岩が存在する。秋吉石灰岩から報告された原地性礁性石灰岩とあわせ、海山上における時代的な造礁生物の変遷を考えると、下部-中部石炭系には少なくとも 3 つのフェイズが確認できる。すなわち上位から下位へ、

3) ケーテーテス類 (*Fusulinella* 帯以降)

2) ストロマトライト (*Millerella* 帯上部-*Akiyoshiella* 帯)

1) サンゴコケムシ (*Medicris* 帯-*Eostaffella* 帯) である。このうち 1) は枠組み (framework) を形成していたとは言い難く、世界的にも mud-mound の形成時期に対比できる。一方、2) と 3) は強固な構造を呈し、現世の reef complex (Longman, 1981) に相当するほどの多様性の高い堆積相を伴う。

ストロマトライトは現在のところ分類群が明らかでないが、太田 (1968) が秋吉石灰岩から報告したものと同一のものである。また、本石灰岩で観察されるそれらの構造は枠組みとしての十分な役割を果たしている。

ケーテーテス類は海外においてもほぼ同時期に繁栄するが、強固な構造を呈する産状の報告はなく、本石灰岩

に見られる形態はきわめて特異な例といえる。

Copper (1988) が提示した *erathemic succession* によると、石炭紀は明瞭な造礁生物が存在しない、すなわち狭義の reef が存在しない *pioneering-arrested phase* として位置づけられている。そのような点においても、青海石灰岩をはじめとする秋吉帯の石灰岩が石炭紀においてはかなり特異な環境で堆積したことが伺える。

(環境地質部)

Keyword : Akiyoshi belt, Omi limestone, Carboniferous, reef builder, sedimentary facies

地球科学における水圧破碎のモデリング

中島善人

水圧破碎とは、流体(例えば水・マグマ)に充填された crack がまわりの弾性体(岩)を brittle に破壊しながら伝播する現象である。Crack の伝播によって結果的に流体が運ばれることになるので、水圧破碎は、地球内部における流体移動のメカニズムとして重要視されてきた。例えば、水圧破碎の痕跡である *metamorphic vein* が変成帯で、岩脈・岩床が火山帯で、それぞれ多数確認されている。このことは、水圧破碎が、沈み込み帯での水移動やリソスフェアでのマグマ移動を考えると重要であることを示唆している。更に、水圧破碎は、地球の初期進化におけるコア・フォーメーション、地殻応力測定、地熱発電、油田の生産能力向上の工事でも登場する。しかし、今回は特に、沈み込み帯での累進変成作用で生じた水の水圧破碎による輸送について話を限定して講演する(Y. Nakashima, 1995, *J. Metamorph. Geol.*, **13**, 727-736)。

沈み込み帯の地下深部では、付加体や海洋プレートにのっている堆積物の圧密や含水鉱物の分解によって、水

が生成されている。水はまわりの岩石より低密度なので浮力に駆動されて鉛直上方に向けて移動する。*Metamorphic vein* の分析やヒートフローの観測によると、この水の移動が、浸透流ではなく、水圧破碎によって行われている可能性がある。しかし、沈み込み帯における *water-filled crack* の伝播現象を実際に観測した例はほとんどない。そこで、*water-filled crack* の伝播がそもそも現実に起こりうるのかどうかについて理論的な検討を行いたい。具体的には、地下を上昇してくる *water-filled crack* の伝播速度や形を推測したい。水は低粘性なので、伝播最中の crack 壁からの浸透による損失(水漏れ)を考慮すべきである。漏れた水は、浸透流で海底に運ばれる。したがって、水漏れ量が大きいと、水圧破碎は有効な水輸送メカニズムではなくなるので注意が必要である。

水圧破碎の物理素過程は、(1) crack 先端における岩石の破壊および crack の弾性変形と(2) crack 中を流れる fluid flow の2つである。本研究では、(1)(2)をそれぞれ線形破壊力学と潤滑理論を用いてモデル化した。モデルでは、リザーバーから水の注入を受けつつ鉛直上方に伝播するタイプの2次元の *water-filled crack* を考察した(crack 壁では水漏れが起きている)。このモデルによって、crack の伝播速度や形を表す近似解を解析的に得ることができた。また、岩石の浸透率と、リザーバーから crack への水の注入速度が、crack 壁からの水漏れ量に強い影響を及ぼすことが分かった。しかし、リーズナブルな範囲で、浸透率が低く、注入速度が高ければ、水漏れは無視できる。例えば、浸透率が 10^{-17}m^2 、水の注入速度が $0.2 \text{m}^2/\text{s}$ ならば、crack は、ほとんど水漏れなしで、15 km を数10分で伝播する。したがって、水圧破碎は、沈み込み帯における有効な水輸送メカニズムになりうるということがわかった。(地殻物理部)

Keywords : hydrofracturing, hydraulic fracturing, vein, fluid, infiltration