

研究成果報告書

財団法人国土地理協会 平成 23 年度学術研究助成

「露出年代測定法を用いた山体の自重による変形履歴の解明」

研究代表者：筑波大学 西井稜子

共同研究者：京都大学 松四雄騎

1. はじめに

山の稜線上では、山体自身の重さで斜面がゆっくり変形する現象（重力性変形）が広く生じており、その結果として、斜面には岩盤の変形に伴い形成された線状凹地と呼ばれる溝状の地形（断層崖のような形態）が現れることが知られている。近年、甚大な土砂災害をもたらすマスムーブメントとして関心が高まっている深層崩壊は、そのような重力性変形が進行した斜面で発生する可能性が高いことが明らかになっており、線状凹地は、深層崩壊の前兆現象として広く認識されている。しかし、崩壊に至るまでの斜面変形は $10^3 \sim 10^4$ 年の長期に及ぶと考えられており、山体の変形開始時期やその形成プロセスに関する詳細な知見は得られていない。

上述のように、線状凹地は山体の変形に伴って形成される地形のため、線状凹地の形成時期を明らかにすることは山体の変形開始時期の解明につながると考えられる。これまで、線状凹地の形成時期（ \approx 山体の変形開始時期）に関する研究は、主に凹地の堆積物に混入している火山灰や有機物の ^{14}C 年代測定によって年代決定が行われてきている。しかし、凹地の形成時期と火山灰や有機物の堆積時期が必ずしも一致しないため、年代値は大きな誤差を含んでいるといえる。

本研究では、露出年代測定法を用いて線状凹地の形成時期を明らかにすることを目的とする。露出年代測定法は、宇宙線の照射により岩石中に生成される放射性核種の蓄積量を計測し、その岩石の地表露出時間を算出する方法である。線状凹地の形成に伴って露出するすべり面（線状凹地の側壁）は、露出後から宇宙線生成核種が蓄積していると考えられるため、すべり面を測定対象とすることで線状凹地の形成時期を決定することが可能になると考えられる。さらに、すべり面に沿って上～下方向に岩石を採取することで、線状凹地の形成プロセス（1 イベントで形成されたのか、もしくは間欠的な動きなのか）についても検討することが可能になる。

2. 調査地域

対象地域は、飛騨山脈中央部に位置する野口五郎岳（2924 m）周辺である（図 1）。高瀬川と黒部川の分水嶺となる主稜線は、標高 2600～2800 m 前後の定高性をもって南北方向に延びている。地質は、白亜紀後期～古第三紀初期に貫入した花崗岩類からなり（原山ほか，1991），一部にトア（基盤岩からなる岩塔）が分布するものの，大部分の斜面は岩塊，岩屑によって覆われている。森林限界は，標高 2500 m 前後である。最終氷期には，野口五郎岳の南西と南南東には氷河が分布していたと考えられており，その痕跡はカールやモレーンとして認められる。黒部川東沢谷を挟んで対岸にあたる水晶岳周辺の氷河後退期は，露出年代測定から 8.3～10.8 ka であることが明らかになっている（Aoki, 2003）。

斜面上部～中部にかけて，稜線とほぼ平行に延びる重力性変形地形（線状凹地）が数多く認められ（清水ほか，1980；西井，2009），その多くは長さ 400 m，高さ 3～5m 前後を示す。最も長い線状凹地は，2 km に及ぶ。線状凹地の側壁（すべり面）は，風化や小規模な崩落によって地表露出後の状態が保たれてない場合が多い。また，斜面上方から下方への土砂移動によって線状凹地は徐々に埋積されており，場所によっては層厚数 m に達していると考えられる。

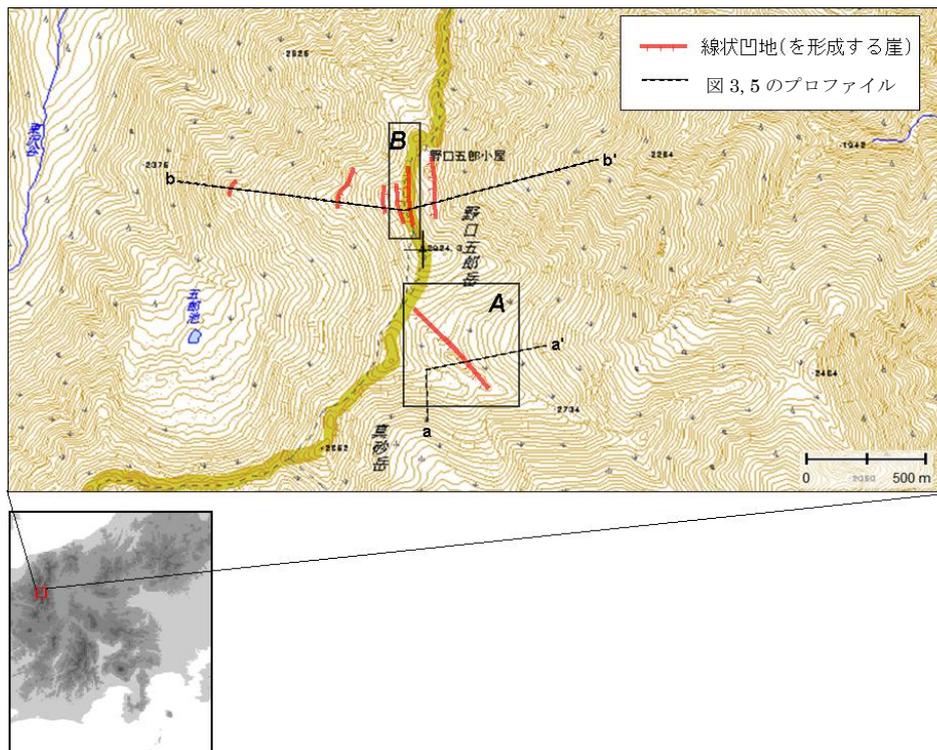


図1 調査地概要.

3. 調査方法

3.1. 試料採取

線状凹地の形成時期を特定するため、2本の線状凹地を対象に岩石試料の採取をおこなった。地点Aの線状凹地は、野口五郎岳南南東のカール壁を北西・南東方向に切っており、長さ約400m、崖（凹地）の高さ約8mの特徴をもつ（図1, 2）。線状凹地によって切られた斜面は、かつては一続きの連続した斜面であったことが斜面形態から認められる。そして、線状凹地は南西方向に約70°傾斜したすべり面に沿う正断層性の動きによって形成されたと考えられる。この線状凹地を選定した理由として、①凹地側壁（すなわち、線状凹地が形成された時のすべり面）がほとんど風化・崩落の影響を受けておらず、年代測定に適した露頭であること、②対象地域内で最も崖が高いため、線状凹地の形成プロセスを検討する上で適していること、③カール壁を切っていることから、氷河の応力開放が線状凹地の形成に影響を及ぼしたのかを絶対年代を軸に検討することが可能であること、が挙げられる。線状凹地の側壁（崖）の頂部から下に向かって、75 cm (sample ID: NL1), 273 cm (sample ID: NL4) の地点において、ハンマーとタガネを用いて岩石を採取した（図3）。また、解氷時期を特定するため、下盤側の基盤岩（sample ID: NL-GB1）を採取した。さらに、下盤側の地表面上で2つの転石を採取した。周囲の花崗岩は等粒状組織の特徴をもつのに対し、この転石は斑状組織を示しており、上盤側のみはこの斑状組織の特徴をもつ岩石の露頭が分布する。現在、下盤側に存在する転石は、崖（線状凹地）形成前～崖が低かった時期に斜面上方から下方に向かって移動してきたと考えられる（現在は崖によって斜面が分断されており、この斑状組織の石は下盤側には移動できず凹地に堆積する）ため、転石の年代値からも線状凹地の形成時期を検討できると考えられる。

一方、地点Bでは、野口五郎岳山頂（2924 m）の北に延びる長さ約200 m、高さ約5 mの山上凹地を対象とした（図1, 4）。凹地には、径1 m前後の巨礫が集積している。これらの巨礫は、主に凹地形成後に側壁が崩れて集積したものと考えられる（図5）。山体の横断面図から、この山上凹地は正断層性の動きによって形成されたと考えられる。上述のように、側壁（すべり面）が崩れており地点Aのような好露頭はないが、側壁の一部と考えられる岩盤（高角度で均一な傾斜を示し、風化が比較的進行していない）を対象に、頂部から下に向かって約205～230 cm (sample ID: NLb1), 約520～530 cm (sample ID: NLb3) の地点において、岩石を採取した。

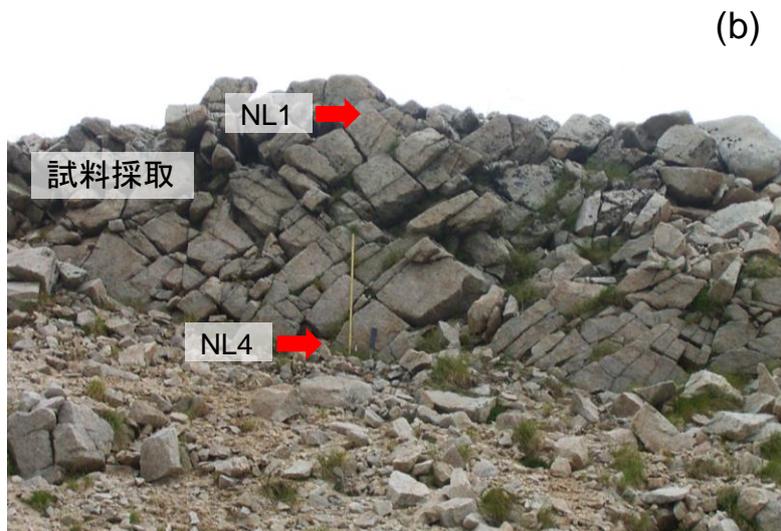


図2 試料採取地点A. (a) 基盤岩および転石の採取. (b) 線状凹地側壁の露頭.

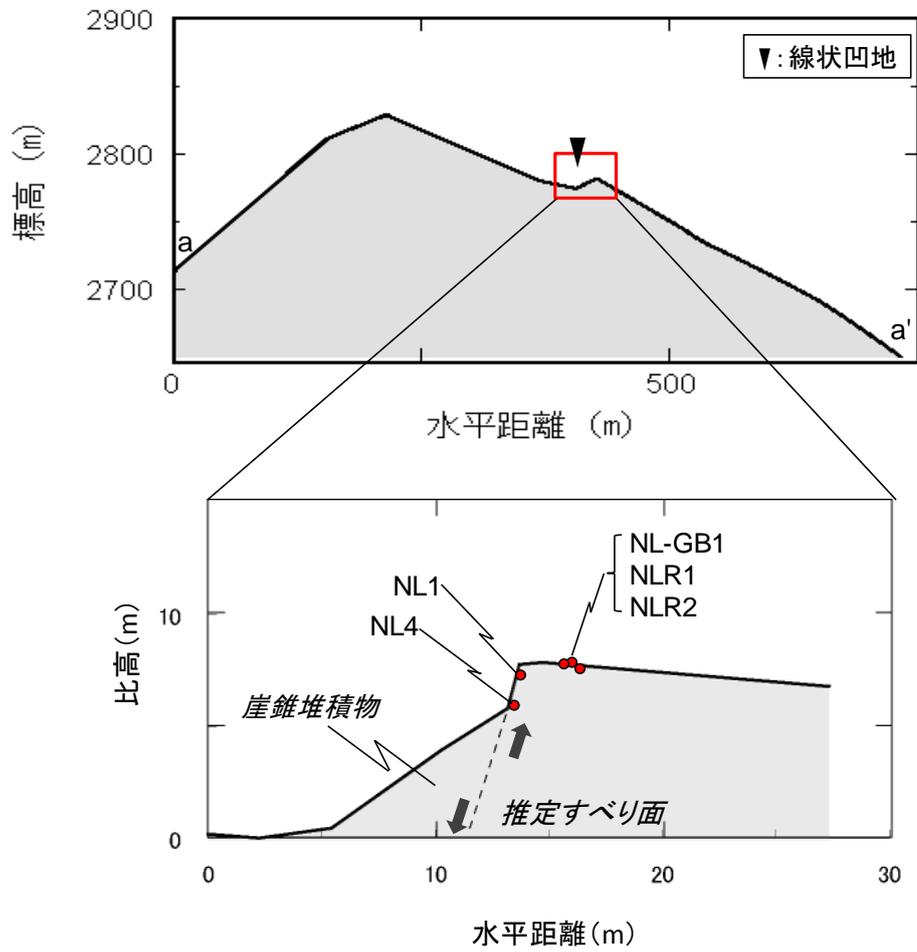


図3 採取地点Aの横断面図. 測線aa'の位置は図1を参照.



図4 試料採取地点B. (a)北から南に向かって撮影した採取地点の概要. (b)南から北にむかって撮影した採取地点. (c)試料採取を行った凹地側壁の露頭(西から東に向かって撮影).

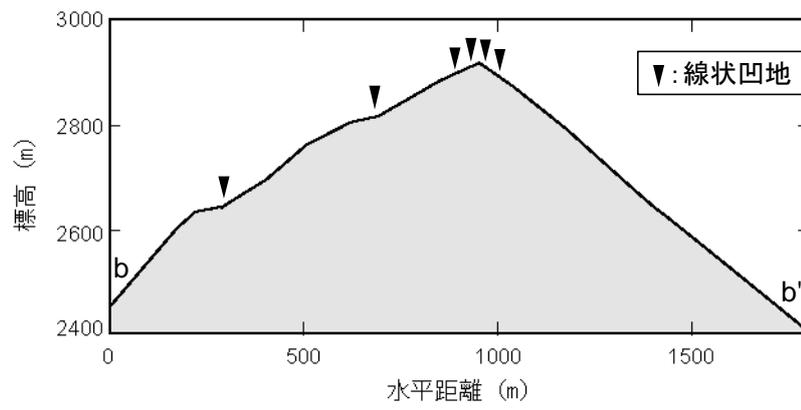


図5 採取地点Bの横断面図. 測線bb'の位置は図1を参照.

3.2. 試料の年代測定

露出年代測定は、宇宙線の照射により岩石中に生成される放射性核種 (^{10}Be , ^{26}Al) の蓄積量を計測し、その岩石の地表露出時間を算出する方法である。本研究では、酸素とケイ素をターゲットとして生成される ^{10}Be (半減期 1.36 Myr) と ^{26}Al (0.705 Myr) を測定対象とした。採取した地点が侵食を受けていない場合、その地点の露出年代は次の式で表される。

$$T = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(1 - \frac{C\lambda}{P} \right)$$

T : 露出時間 (yr)

λ : 核種の壊変定数 ($\lambda = \ln 2 / \text{核種の半減期}$)

P : 核種生成率 (atoms/g/yr)

C : 核種量 (atoms/g)

核種生成率は、採取地点の緯度と標高に依存しており、Stone (2000) によって提案されているスケーリングをもとに算出した (表 1)。一方、 ^{10}Be , ^{26}Al の核種量は、採取した試料を物理的、化学的処理をおこなったのち、加速器分析により計測した。具体的には、採取した岩石試料を粉砕し、篩で粒径 1~0.25 mm を選別した (図 6)。その後、粒径 1~0.25 mm の試料の塩酸処理、フッ酸リーチングをおこない (図 7, 8)、試料に含まれていた有機物、粘土鉱物、Meteoric ^{10}Be を除去した。そして、陰イオン、陽イオン交換により Be と Al を単離し、BeO と Al₂O₃ の酸化物にし、加速器用ターゲットホルダーに詰め、加速器で 2012 年 2 月と 3 月に計測をおこなった。

表1 試料採取地点の情報および核種生成成率

Sample ID	採取地点	標高 (m)	採取の深さ (cm)	^{10}Be 生成率 (atoms $\text{g}^{-1} \text{yr}^{-1}$)	^{26}Al 生成率 (atoms $\text{g}^{-1} \text{yr}^{-1}$)
NL-GB1	基盤	2788	1.5 ± 1.5	31.3 ± 2.0	211.9 ± 13.9
NLR-1	転石	2788	2.0 ± 2.0	31.6 ± 2.1	213.9 ± 14.8
NLR-2	転石	2788	1.8 ± 1.8	31.7 ± 2.1	214.8 ± 14.4
NLb1	線状凹地の側壁	2920	1.0 ± 1.0	31.4 ± 1.9	212.4 ± 13.4
NLb3	線状凹地の側壁	2920	1.0 ± 1.0	29.4 ± 1.8	199.0 ± 12.5
NL1	線状凹地の側壁	2787	1.0 ± 1.0	21.8 ± 1.3	147.6 ± 9.3
NL4	線状凹地の側壁	2785	2.0 ± 2.0	21.4 ± 1.4	145.0 ± 10.0



図6 粉碎，整粒後の試料. 1~0.25 mm粒径の試料を分析に用いる.



図7 塩酸処理後の試料.



図8 大型超音波水槽でフッ酸リーチング中の試料.

4. 結果と考察

分析結果を表 2 に示す。核種濃度 (atoms/g) は、 ^{10}Be が $10^4\sim 10^5$ オーダー、 ^{26}Al が $10^5\sim 10^6$ オーダーを示した。線状凹地側壁の上部・下部で採取した試料の核種濃度は明瞭な差異が認められた。地点 A の線状凹地では、NL1 (上) は NL4 (下) に対して約 4 倍の核種濃度を示し、地点 B の山上凹地では、NLb1 (上) は NLb3 (下) に対し約 2 倍の核種濃度を示した。 ^{10}Be 核種濃度と $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ の図を基に、採取地点が地表に露出して以降、その場所が侵食や埋没を経験しているかを判断することができる (図 9)。 ^{10}Be 核種濃度が $10^4\sim 10^6$ オーダーの時、露出後に侵食、埋没を経験していない場合には $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 値は 6.8 ± 0.6 を示す。線状凹地側壁から採取した 4 試料 (NL1, NL4, NLb1, NLb3) の $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 値は 7 前後を示すため、各採取地点は、地表に露出して以降、侵食や埋没をほぼ経験していないと考えられる。一方、2 つの転石 (NLR-1, NLR-2) の $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 値は、5.9 と 2.8 を示した。NLR-2 の $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 値は 2.8 を示すため、露出後に埋没イベントを経験していると考えられる。また、基盤岩の $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 値は 9.4 を示し、侵食や埋没イベントは説明できない値を示した。この原因として、化学処理の過程においてコンタミネーションなどの問題があった可能性が考えられる。

採取地点 A

線状凹地の側壁上部・下部で採取した NL1 と NL4 では核種濃度に明瞭な差が認められるが、これは次の 2 つの原因が考えられる。1 つは、線状凹地の形成以前 (採取地点が露出する前) から地中を通過した宇宙線によって生成された核種の蓄積量の差異を反映している可能性である。もう 1 つは、線状凹地の形成が時間をかけて徐々に形成されてきたため、側壁の上部・下部の露出した年代が異なっている可能性である。

前者は、線状凹地形成前の地表面から採取地点がどの程度の深さに位置していたかを推定し、その深度における核種生成率を求めることで検討できる。現在の地表面形態から、線状凹地形成以前の地形面を復元すると、その地表面から採取地点までの深度は、おおよそ NL1 は 75 cm, NL4 は 276 cm である (表 3)。計測された核種濃度に達するには、線状凹地が形成される以前の地表面の露出時間が 13.5kyr もしくは 41 kyr が必要であるという結果になる (図 10)。このことは、1 回のイベントの動きだけでは計測された NL1 と NL4 の核種濃度の差異を説明できず、側壁の上部・下部の露出した時期 (露出時間) が異なっていることを示す。

線状凹地側壁の採取地点が地表に露出した時点での核種量を 0 と見なした場合 (単純モデル)、採取地点の核種生成率と核種濃度から求めた最小露出時間は、NL1 が約 6000 年、NL4 が約 1400 年を示す (表 4, 図 11)。すなわち、線状凹地は少なくとも 2 回以上の間欠的なイベント、もしくは緩慢な速度で徐々に形成されてきたといえる。また、NL-GB1 の

表2 分析結果

Sample ID	石英 (g)	Total stable Be wt. (μg)	Total stable Al wt. (μg)	^{10}Be ($\times 10^{-12}$)	^{26}Al ($\times 10^{-12}$)	^{10}Be (atoms g^{-1})	^{26}Al (atoms g^{-1})	$^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$
NL-GB1	48.3390	310.2 \pm 1.6	6749.5 \pm 52	0.62 \pm 0.02	0.77 \pm 0.03	(2.60 \pm 1.12) $\times 10^5$	(24.4 \pm 1.12) $\times 10^5$	9.4 \pm 0.5
NLR-1	10.5261	308.5 \pm 1.5	74103.7 \pm 669	0.16 \pm 0.01	0.01 \pm 0.00	(2.84 \pm 6.37) $\times 10^5$	(16.8 \pm 3.14) $\times 10^5$	5.9 \pm 1.2
NLR-2	8.1974	308.9 \pm 1.5	767.4 \pm 12	0.10 \pm 0.01	0.31 \pm 0.02	(2.18 \pm 0.51) $\times 10^5$	(6.12 \pm 0.54) $\times 10^5$	2.8 \pm 0.3
NLb1	48.3330	306.7 \pm 1.5	5735.0 \pm 23	0.70 \pm 0.02	0.73 \pm 0.03	(2.91 \pm 0.94) $\times 10^5$	(19.5 \pm 0.94) $\times 10^5$	6.7 \pm 0.4
NLb3	49.6375	309.5 \pm 1.5	5984.6 \pm 64	0.35 \pm 0.01	0.38 \pm 0.02	(1.38 \pm 0.58) $\times 10^5$	(10.2 \pm 0.58) $\times 10^5$	7.4 \pm 0.5
NL1	51.4940	306.4 \pm 1.5	6295.5 \pm 34	0.32 \pm 0.01	0.34 \pm 0.02	(1.22 \pm 0.45) $\times 10^5$	(9.30 \pm 0.44) $\times 10^5$	7.6 \pm 0.5
NL4	49.4213	306.6 \pm 1.5	6712.0 \pm 60	0.09 \pm 0.005	0.07 \pm 0.01	(0.30 \pm 0.24) $\times 10^5$	(2.19 \pm 0.21) $\times 10^5$	7.3 \pm 0.9

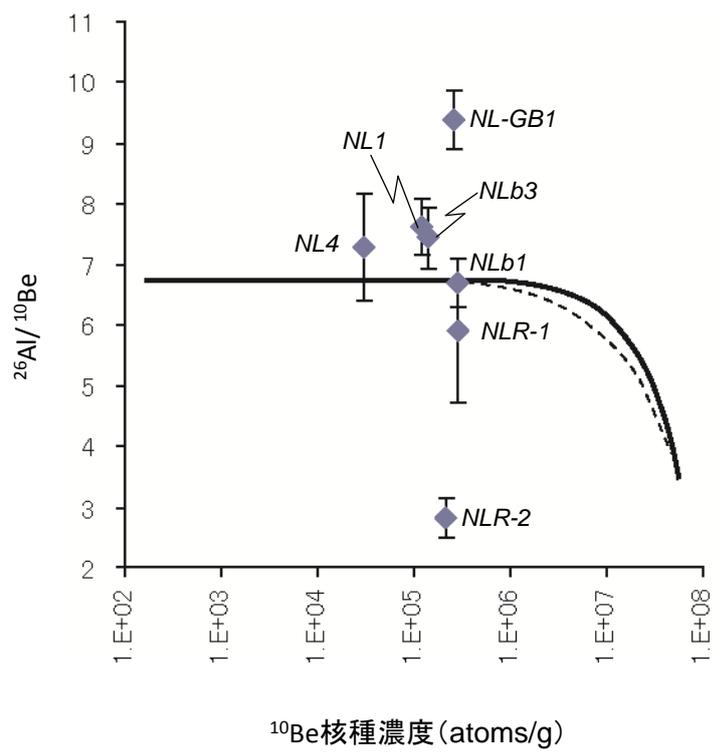


図9 ^{10}Be 核種濃度と $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ の関係

値は、地点 A の解氷したタイミングが 9000~11000 年頃であることを示す。ただし、前述したように $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ が 9.4 を示すため、この値についての解釈は十分に留意する必要がある。

以上をまとめると、野口五郎岳南東のカールでは、完新世初期（11~9 kyr）に氷河が後退し、その後、線状凹地（崖）は 6000 年前から徐々に形成され始めた。線状凹地は 1 回のイベントによって形成されたのではなく間欠的（or 徐々に）成長してきており、崖高と露出年代値から算出した線状凹地の平均形成速度は $10^{-1}\sim 10^{-2}$ cm/yr オーダーである。

採取地点 B

地点 A と同様に、採取地点が地表に露出するまでの核種量を 0 と見なした場合（単純モデル）、山上凹地の側壁上部（NLb1）・下部（NLb3）の最小露出時間は、それぞれ約 9000 年と約 5000 年を示し（表 4, 図 11）、凹地は複数回のイベントで（or 徐々に）成長してきたと考えられる。崖高と露出年代値から算出した線状凹地の平均形成速度は 10^{-2} cm/yr オーダーといえる。

表3 線状凹地(崖)形成前の試料採取地点の核種生成率

Sample ID	崖形成前の深さ (cm)	崖形成前の採取地点における	
		^{10}Be 生成率 (atoms g^{-1} yr^{-1})	^{26}Al 生成率 (atoms g^{-1} yr^{-1})
NL1	74.83	9.8 ± 1.0	66.3 ± 6.6
NL4	276.71	0.8 ± 0.2	5.2 ± 1.2

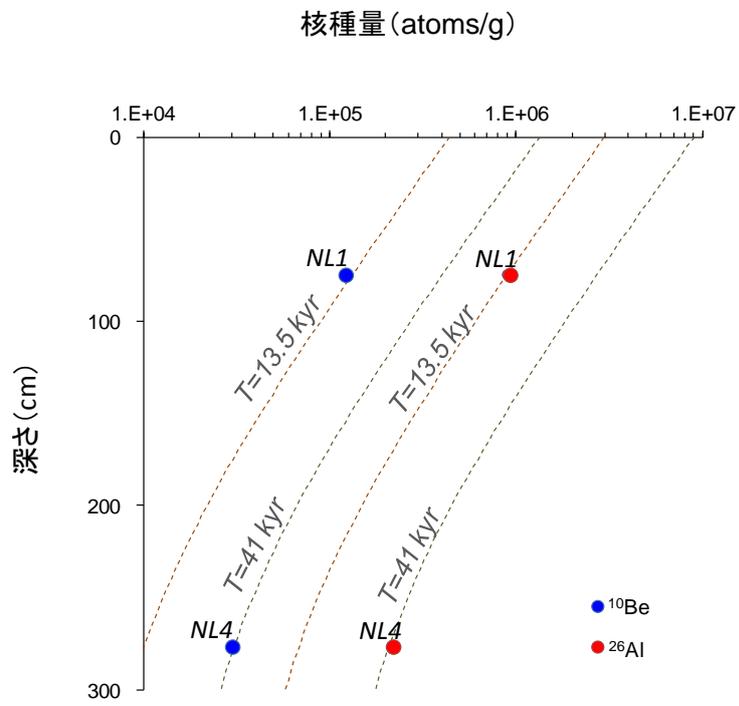


図10 線状凹地形成前のNL1とNL4の核種濃度

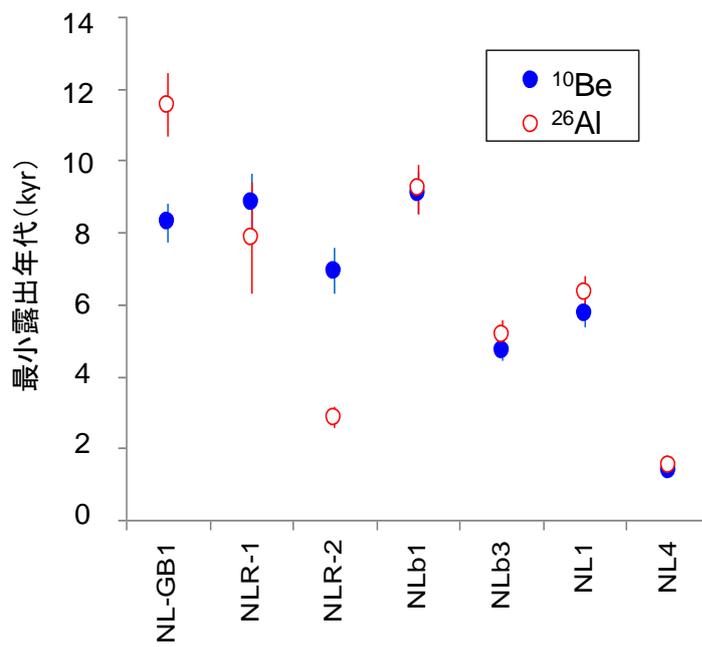


図11 各試料の最小露出年代値

表4 試料採取地点の露出年代値

Sample ID	^{10}Be exposure age (kyr)	^{26}Al exposure age (kyr)
NL-GB1	8.29 ± 0.57	11.57 ± 0.93
NLR-1	8.84 ± 0.83	7.86 ± 1.58
NLR-2	6.95 ± 0.65	2.86 ± 0.32
NLb1	9.10 ± 0.61	9.21 ± 0.73
NLb3	4.73 ± 0.33	5.16 ± 0.44
NL1	5.74 ± 0.40	6.32 ± 0.50
NL4	1.38 ± 0.13	1.51 ± 0.18

採取地点が地表に露出する時点において、核種量が0と見なした場合の値。

5. まとめと今後の課題

本研究では、露出年代測定法を用いて野口五郎岳周辺に分布する線状凹地2本の形成時期を特定した。その結果、2本の線状凹地は1回のイベントで形成されたのではなく、複数回のイベント、もしくは時間をかけて形成されてきたことが明らかになった。カール壁に分布する線状凹地は、6000年前に形成され始め、その平均形成速度は $10^{-1} \sim 10^{-2}$ cm/yr オーダーと推定された。一方、野口五郎山頂付近の山上凹地は、9000年前に形成され始め、その平均形成速度は 10^{-2} cm/yr オーダーと考えられる。

本報告では、核種生成率に影響を及ぼす積雪の被覆効果を考慮していない。また、採取地点が地表に露出する時点までの核種量を0と見なしたが、採取地点が露出する以前であっても地表面近傍の地中に位置している場合には、宇宙線の照射により核種は生成される。したがって、報告した値は最小露出年代値であり、線状凹地の形成時期は過小評価を、線状凹地の成長速度は過大評価している可能性がある。今後、積雪の被覆効果と地中での核種蓄積量を考慮したモデルを構築する必要がある。また、線状凹地の形成開始時期に影響を及ぼすであろう要素（氷河後退、降水量の増減、地震活動）との関係についても、今後検討していく予定である。

6. 引用文献

- Aoki, T. (2003) Younger Dryas glacial advances in Japan dated with in situ produced cosmogenic radionuclides. Transactions, Japanese Geomorphological Union 24, 27–39.
- 原山 智・竹内 誠・中野 俊・佐藤岱生・滝沢文教（1991）槍ヶ岳地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）。地質調査所。
- 西井稜子（2009）飛驒山脈の花崗岩山域における斜面崩壊が線状凹地の分布に及ぼす影響。地学雑誌 118, 233–244.
- 清水文健・東郷正美・松田時彦（1980）日本アルプス・野口五郎岳付近における小崖地形の成因。地理学評論 53, 531–541.
- Stone, J. O. (2000) Air pressure and cosmogenic isotope production. Journal of Geophysical Research 105, 23753–23759.