

ガリの発達とそれに伴う土砂生産過程

THE PROCESSES OF GULLY DEVELOPMENT AND SEDIMENT YIELD

水嶋 大樹¹・泉 典洋²
Hiroki MIZUSHIMA and Norihiro IZUMI

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

²正会員 Ph.D. 東北大学助教授 大学院工学研究科 土木工学専攻 (同上)

Surface flow produced by heavy rainfall concentrates on local troughs, resulting in further erosion of troughs and the formation of gullies. In the development process of gullies, a great amount of soil runs off. In this study, long-term changes of topography around gullies formed on Soya Hill are analysed with the use of present and old topographical maps. In the analysis, detailed processes of gully development are revealed, and the annual average sediment yield is estimated to be 60 mm/year. We also conduct a field observation of a gully and a field survey around the gully head. It is found that the channel head is in the process of splitting into three branches.

Key Words : *gully erosion, channel head, sediment yield, development process of gullies*

1. はじめに

農耕地や都市の開発のために山間部において森林の伐採が行われると、山の地表面が荒廃して侵食されやすくなり下流へ流出する土砂量が増加する。山地領域の生産土砂量の増加は土石流や河床上昇などの土砂災害をもたらす。戦後、植林や砂防ダムの整備が行われるとともに治水事業によって堤防や洪水調整ダムの整備が行われ大規模な土砂災害や水害は減少したものの、一方で河川への供給土砂量が減少し河床が異常に低下したり海岸が侵食されたりといった問題も起きている。このような問題に対処するためには、土砂の生産量を正確に把握することが不可欠である。この土砂生産の原因としては、地すべりや斜面崩壊、地表侵食などが考えられる。これらは現象によって発生頻度と規模が異なるが、最も発生頻度が高いと考えられるのが地表侵食である¹⁾。

この地表侵食の一因となっているのが、降雨による表面流である。表面流は地表に雨水が降ることによって発生し、地表を侵食しながら標高の高いところから低いところへと流れていく。流下するにしたがって流れが局所的に集中する箇所が現れる。流れが集中すると侵食が活発になり、標高が低下する。局所的に低くなったところにはさらに多くの表面流が集まることによって侵食がさらに促進される。このように地表面形状の変化と流れの相互作用によって地表にはガリが形成される。

発生当初のガリは一筋の溝にすぎない。しかし時間が経つにつれて、地表面の侵食とそれに伴う流れの集中という二つのプロセスの相互作用によってガリは特徴的な幾何形状へと発達していく。ガリの発達に伴って地表面が大きく侵食され、多くの土砂が下流へと流出する。したがってガリの発達過程を知ることによりガリ流域の生産土砂量の予測が可能になると考えられる。このような観点から本研究では、宗谷丘陵を対象として新旧の地形図を用いたガリの横断面図の作成を行い、比較することによってガリ周辺の流域における地形変化の様子を調べ、ガリの発達過程について考察し、ガリが発達することにより生産される土砂量の算出を行った。また地形図や空中写真では読み取れないような微細な地形を詳細に調べるためにガリ内部および頭部周辺において現地調査及び実測を行い、侵食が著しいとされるガリ頭部の発達過程、そしてそれに対する表面流および地下水による作用の重要性を明らかにした。

2. 宗谷丘陵の概要

宗谷丘陵は図-1に示すように、日本の最北端の宗谷岬から天塩川の南方まで伸びる、なだらかな波状の起伏を有する丘陵地である。丘陵面上に形成された広い皿状谷には谷底を深く刻んだガリが数多く形成されている。海岸沿いには海岸段丘が発達しているが、全体に海岸段丘の起伏は小さく、段丘と丘陵の区別がつきにくい²⁾。



図-1 宗谷丘陵.

図-2 は宗谷岬における平均気温および月降水量を示したグラフである。これを見ると宗谷丘陵の気候は冷涼で、夏は約 20℃まで上昇し、冬は-5℃まで低下することが分かる。また冬から梅雨の時期にかけて降水量が少なく、夏から冬にかけて多くなっている。年間降水量は 800 mm 程度であり、日本の平均的な降雨量と比較すると、ほぼ半分しかない。強風の吹く日が多く、平均風速は 7 m/s を超えている³⁾。

このような気候のため宗谷丘陵には周氷河地形と呼ばれる特徴的な地形が見られる。周氷河地形とは凍結—融解の繰り返しの影響が顕著な地形のことである⁴⁾。地中の水分が凍ると体積が膨張し大きな圧力が発生するため岩石が破砕する。これは凍結融解作用と呼ばれる。宗谷丘陵では表土の下に破砕した砂岩が数 m の厚さで斜面を覆っている²⁾。このように凍結融解作用によって風化が著しく進むため、地表の耐侵食性が小さくなりガリが発達しやすくなる。

また、この地域は明治時代以前は針葉樹林に覆われていたが、しばしば山火事にみまわれたことによって針葉樹林がすっかり姿を消してしまい、現在では一面の笹原に変わっている²⁾。さらに宗谷丘陵の北端の宗谷岬付近では、1983 年に（社）宗谷畜産開発公社が設立され牧場ができたことによって植生が笹から牧草に変化している。

このように宗谷丘陵はガリが発達しやすい周氷河地形であり、地表が樹林に覆われていないため地形の特徴が分かりやすい。ガリの発達過程の調査をするには非常に適した地域と言えるだろう。

3. 対象領域

今回対象としたガリを図-3 に示す。図の左上に見えるのがオホーツク海であり、その下の国道 238 号を境

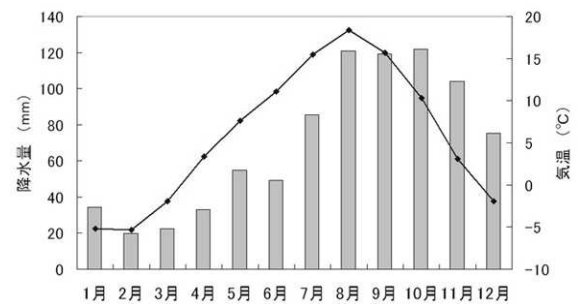


図-2 宗谷岬の気温および降水データ.

にして標高約 50 m の海岸段丘が形成されている。この段丘の南東から北西にかけて 3 つのガリがほぼ平行に形成されている。図-3 中に示したようにこれら 3 つのガリを左から a, b, c と呼ぶことにする。地形図から読み取ったガリ a-c 周辺の流域面積はそれぞれ 134,000 m², 114,000 m², 110,000 m² であった。これらのガリは宗谷丘陵の中でも比較的小さく、いまだに発達しつつある過程にあると考えられるため、ガリの発達過程を調査するには適切であると言える。

4. 研究方法

凍結融解作用によって侵食されやすい周氷河地形にあっても、ガリが著しく発達するためには長い年月が必要である。本研究では新旧の地形図を用いて長期間にわたる地形の変化を分析し、ガリの発達による生産土砂量の算出を行う。また地形図および空中写真では確認できないような微細な地形や地表の様子を現地の調査および測量で調べることでガリの発達過程を明らかにする。

(1) 地形図を用いた地形変化分析

現在、日本全国を網羅した最も精密な地形図は、国土地理院発行の 1/25,000 の地形図である。都市部には 1/10,000 の地形図や 1/2,500 の基本図が存在している地域もあるが、今回対象とするような山間部には存在していない。1/25,000 の地形図でガリの地形変化を定量的に議論できるほどの精度が得られるか疑問はあるが、他により適した地形図が存在しないことから 1/25,000 の地形図を用いることにする。ただし精度の検証手段として、対象領域における侵食量を算出し、他の研究者によって得られている侵食量と比較することにより、分析結果の精度について議論することとする。

宗谷岬における国土地理院発行の地形図として最も古いものは、昭和 35 年発行（昭和 32 年測量）の地形図である。その後に昭和 46 年および 54 年、平成 7 年、平成 15 年に発行されているが、昭和 46 年および 54 年

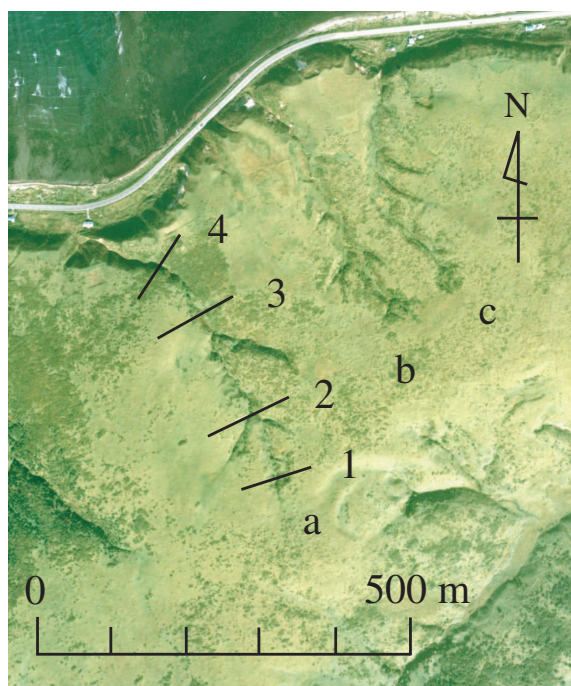


図-3 対象領域.

発行の地形図は昭和 35 年発行の地形図を修正したものである。その後平成 6 年に改測（平成 7 年発行）が行われ、平成 13 年に修正（平成 15 年発行）されている。そこで実際に測量された昭和 32 年測量の地図と、平成 6 年測量の地形図を用いて地形変化を調べることとした。

昭和 32 年および平成 6 年測量の二種類の地形図の等高線をディジタイザーで取り込み、標高のデジタルデータを作成する。得られたデジタルデータを任意の点において補完することによって任意断面の断面図を作成する。ガリの上流と下流で昭和 32 年と平成 6 年における横断面図を比較することで、場所によるガリの断面形状変化を明らかにした。またそれらを考慮し、宗谷丘陵におけるガリの発達過程についての考察を行った。

(2) ガリの発達に伴う生産土砂量の算出

作成したデジタルデータを 10 m × 10 m のメッシュで区切り、メッシュごとに昭和 32 年から平成 6 年の標高データを引くことで 37 年間の標高差すなわち侵食量を算出し、侵食量の空間分布図を作成する。またその分布をガリ周辺の集水域の範囲で積分することにより、ガリの流域全体での生産土砂量および単位面積当たりの年平均土砂生産量を算出する。

(3) 現地調査およびガリ頭部周辺の測量

ガリ周辺の形状を大まかに把握するだけならば、地形図や空中写真などを使えば十分に可能である。しか

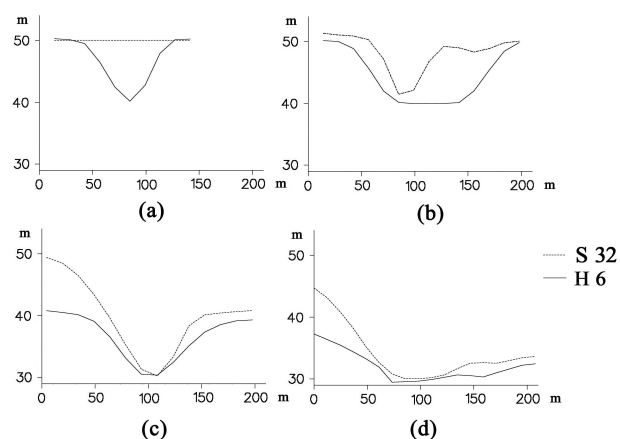


図-4 ガリ a の横断面形状変化. (a) 断面 1, (b) 断面 2, (c) 断面 3, (d) 断面 4

し、ガリの最も上流に位置する頭部周辺の地形は微細である。またガリには笹や木々が茂っているため地表やガリ内部の様子が空中写真では判読できない。そのため現地でガリ内部および頭部周辺の調査、測量を行い、地形図や空中写真からは判読不可能なガリ内部の様子や微細なガリ頭部周辺における集水域の特徴を明らかにした。

5. ガリの発達と土砂生産

(1) ガリ断面の形状変化

図-3 のガリ a の横断面 1-4 における断面図を示したのがそれぞれ図-4 の (a)-(d) である。ガリの最も上流である断面 1 に相当する図-4(a) を見ると、昭和 32 年はほぼ平坦であったのに対し、平成 6 年には深さ 10 m ほどのガリが生じている。その下流の断面 2 を示した図-4(b) では、谷底の深さ自体はそれほど変化していないが幅が大きく広がっている。図-3 を見ると、ここはちょうどガリの分岐地点となっている。このことより分岐が発達するにつれて谷底の幅が広がることが分かる。昭和 32 年の断面をみると、右側に小さなくぼみがあり、このくぼみが発達して支流となっていくと考えられる。さらに下流の断面 3 (図-4(c)) および 4 (図-4(d)) では、深さ自体は変化しておらず、側面が侵食されていることが分かる。ガリがあまり発達していないときはほぼすべての表面流がガリ頭部に流入する。しかしガリが上流に向かって発達すると、側面からも表面流が流れ込むようになり、斜面が侵食されて後退するのであると推測される。そのほか、斜面崩壊などによる可能性も考えられるが、空中写真ではその痕跡はほとんど確認できなかった。いずれにしてもガリ頭部周辺では上流方向へとガリが発達するのに対し、下

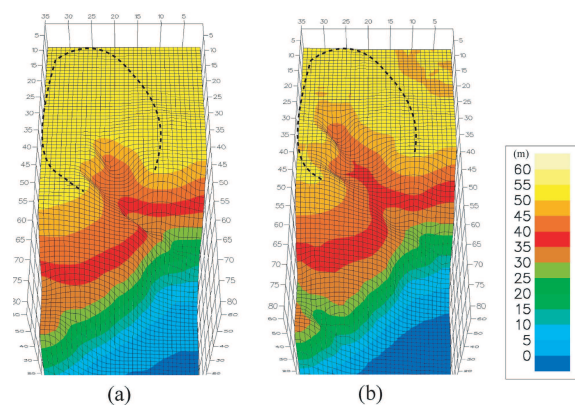


図-5 ガリ a 周辺の表層グラフ. (a)1957 年, (b)1994 年

流では横方向へと発達することが分かる。

図-5 に図-3 のガリ a 周辺の表層グラフを示す. (a) および (b) はそれぞれ昭和 32 年 (1957 年) 及び平成 6 年 (1994 年) における地形を示している. 図の下が北であり, 上に向かうにしたがって標高が高くなっており, ガリ周辺の集水域の勾配は 0.01–0.05 程度である. この集水域の範囲は地形図で等高線が標高の低い方に向かって凸になっていることで確認される分水嶺に沿うようにして決定した (図中点線内). 図を見ると 37 年間でガリは約 110 m ほど上流へ伸びており, 頭部付近の発達が著しいことが分かる. またガリが発達することによって集水域面積が減少している. このガリでは流域が小さく, ガリが発達による集水域面積の減少がガリが発達自身に大きな影響を与えることが考えられる. 集水域が減少すると, ガリに流入する表面流および浸透水が減少し, 同程度の降雨量であっても侵食速度が減少してしまうことになる. またガリの分岐現象も頭部の発達に大きな影響を与える. 分岐が発生するとガリ頭部が複数に別れ, 一つのガリ頭部に流入する流量が減少するため, ガリが発達する速度も減少していくと考えられる. このようにガリは発達に伴って発達速度を減少させていく.

(2) ガリが発達過程

図-3 のガリ a の発達過程を概念的に示したのが図-6 である. 図中に描かれている矢印は表面流の流れる向きと流量を表したものであり, 図-6(a) はガリが発達し始める前の地形である. まず頭部に集水域からの表面流が集中すると, 上流方向に移動するように発達する (b). ある程度まで発達すると, 頭部が上流方向に向かって分岐する. 分岐すると, 上流の集水域から流入する表面流の流量もガリごとに分かれ, 一つの支流当たりの流量が減少し, 発達速度が減少する (c). さらに発達すると, ガリ頭部より下流に位置する集水域の表面流が

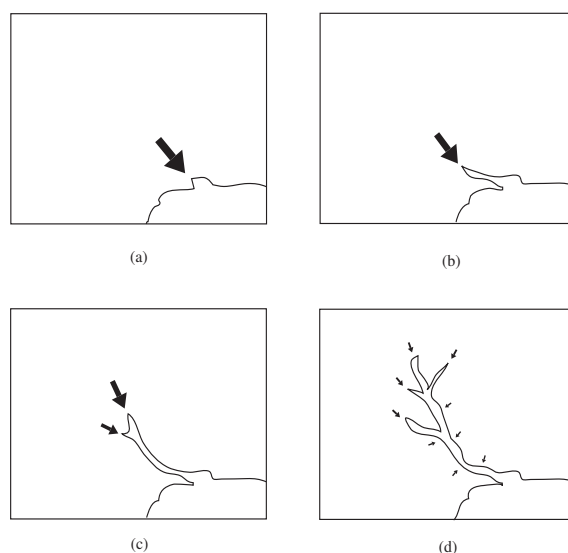


図-6 ガリが発達過程の概念図.

頭部からではなく側面から流れ込むようになり, 側面も侵食され, 少しずつ後退していく. 最終的には, 集水域から流入する表面流の流量では地表が侵食されなくなり, ガリが発達が止まる (d).

(3) ガリが土砂生産量算出

図-3 のガリ a 周辺の集水域およびガリ b, c 周辺の集水域の範囲の侵食量を算出し, 空間分布として示したのがそれぞれ図-7(a), 図-7(b) である. 図の上が北であり, 集水域は図-5 と同様に決定した (図中点線内). 図-7(a), 図-7(b) を見ると, 両方とも勾配が 0.15–0.17 のガリ頭部付近で色が濃くなっており, 侵食が集中していることが分かる. また勾配が 0.04 程度のガリ a の中流付近では堆積が見られる.

侵食量をガリ周辺の集水域の範囲で足し合わせることで集水域全体の生産土砂量を算出した. その結果, 37 年間に生産された土砂量はガリ a では 218,000 m³, ガリ b, c ではそれぞれ 243,000 m³, 316,000 m³ となった. また年平均土砂生産量はそれぞれ 5,890 m³/year, 6,570 m³/year, 8,570 m³/year であり, 単位面積当たりの年平均土砂生産量は 45 mm/year, 58 mm/year, 78 mm/year となった.

小野寺⁶⁾は, 宗谷丘陵と同様に周氷河地形である天塩川流域においての調査を行い, 年間侵食量を 0–55 mm と算出している. 本研究では若干値が大きいもののオーダー的にはほぼ同じであり, 定性的には大きな誤りを含んでいないことが期待できる.

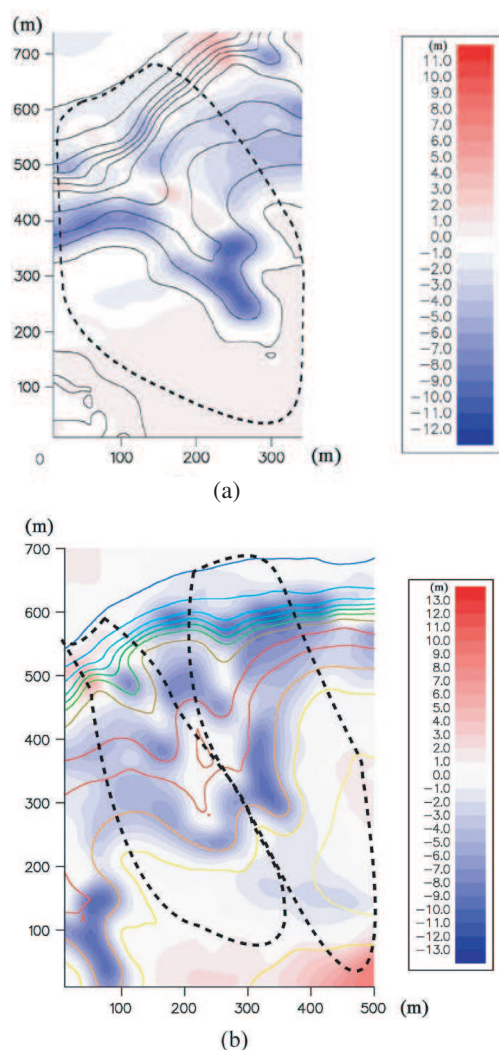


図-7 ガリ付近における侵食量の分布. (a) ガリ a, (b) ガリ b 及び c

6. ガリの現地調査および実測

宗谷丘陵に見られるガリは内部に植生を有しており、空中写真ではガリ内部の様子を確認できない。また頭部周辺ではガリの分岐につながるような微細な地形変化が生じていると考えられるが、これを地形図や空中写真から判読することは困難である。そこでガリ内部の調査およびガリ頭部周辺の測量を行い、ガリの発達過程についての手がかりとする。

(1) ガリ内部及び頭部周辺の現地調査

今回調査を行ったガリ頭部周辺の集水域には起伏がほとんどなく、勾配は緩やかに海側に傾いており、地表には牧草が生えていた。

上流の斜面および谷壁では人の背丈をこえる程の笹が密に群生しており、地表が見えないほどであった。

図-8(a)はガリの中流付近を下流から上流に向かって

撮影したものである。写真の上端中央から右に湾曲して下端中央へとガリの底部が確認できる。また中央左には地下水の湧出する直径 50 cm 程度の穴が見られた。ガリの発達には表面流だけでなく地下水も関係していると考えられているが、地下水の流出する穴はガリの頭部から離れた位置にあり、また流出地点が上流へと後退しているような形跡は見えない。したがって少なくともこのガリでは上流側へのガリ頭部の発達に対して地下水が大きな影響を及ぼしているとは考えにくい。一方で下流に向かってかなりの流量の水が地下水によってガリ底部へと流入しているの、下流では降雨時に発生する表面流による作用だけではなく、非降雨時における地下水流による作用も大きな影響を及ぼしていることが分かる。非降雨時にも地下水が流出するため、河床付近は側壁よりも多くの水分を含むことになる。したがって凍結による水分の膨張量が多く凍結-融解作用が著しくなるため、河床付近は側壁よりも侵食されやすくなると考えられる。このことより下流では地下水がガリの発達過程に重要な役割を果たしていると推測される。また、中流は上流と比較して勾配が緩やかであり、ある間隔で 40-60 cm ほどの段差が形成されていた。これは侵食が卓越し流れが射流となる急勾配平坦河床が不安定になることによって河床に形成される連続な段差⁵⁾であると考えられる。

図-8(b)は下流の谷壁斜面を撮影したものである。写真のように斜面のところどころで局所的に地すべりが発生し、地表面が露出していた。このような露出した斜面では凍結融解作用により岩石が破碎、風化しており、大きさ数十 cm の平らで角張った石やシルト状になった砂が斜面を覆っていた。また下流底部の勾配は中流よりも急になっており、凹凸のない滑らかな岩盤が露出していた。

(2) ガリ頭部周辺の地形測量

図-3のガリ a 周辺を測量して得られた地形データを図-9にコンター図として示す。図の上が北であり、点線で囲まれているコンターの無い領域がガリ a である。図の上から下に向かって標高が高くなっており、図の中央付近が頭部である。この頭部を中心として標高がまわりより低い部分が上流に向かって三方向に伸びていることが分かる。このような周囲より低いところには表面流がより多く集まり、侵食が進んでいくものと考えられる。これらがさらに発達して、やがてガリ頭部は分岐するものと推測される。

泉⁸⁾はガリ頭部を円形の開口部でモデル化し、開口部の円周方向擾乱に対する安定性を調べることにによりこの分岐過程を理論的に説明した。それによって限界水深/底面摩擦係数 (H_c/C_f) とガリ頭部半径 (R_c) の比

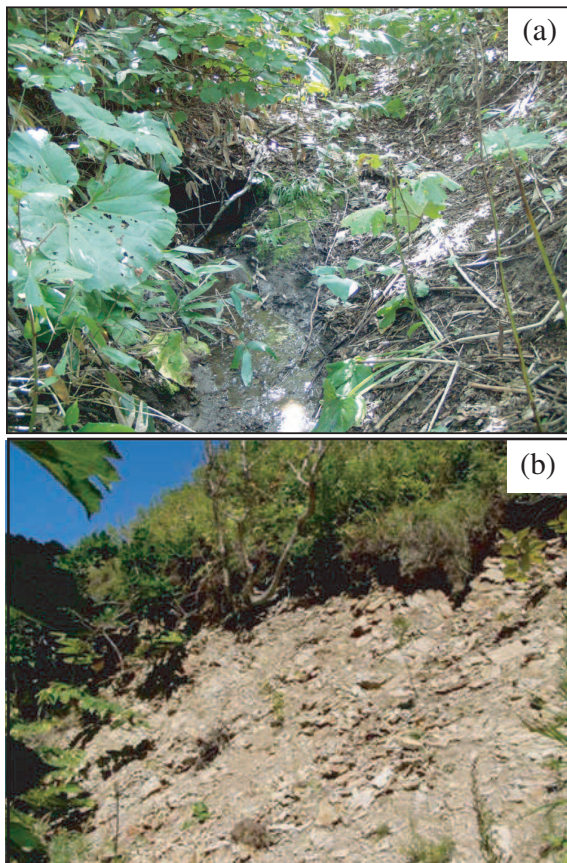


図-8 ガリ内部の写真. (a) 中流付近, (b) 下流付近

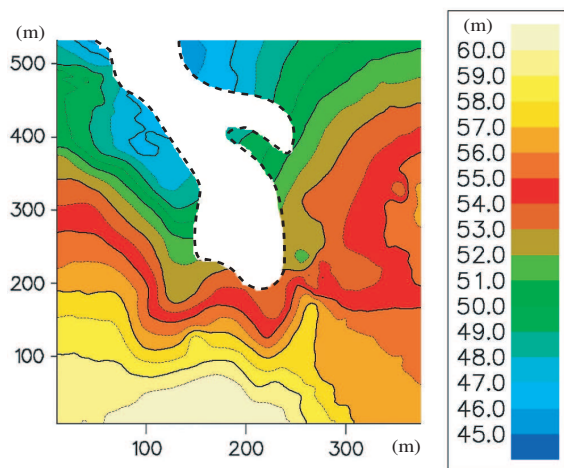


図-9 実測により得られたガリ頭部周辺の地形.

が 0.1–0.2 より小さくなると、ガリ頭部は擾乱に対して不安定となり分岐が生じ始めることが明らかとなった。空中写真や実測の結果から図-3 のガリ a の頭部半径は約 20 m であることが分かる。 C_f は 0.01 のオーダーを持っているので、限界水深 H_c は約 2 cm となる。この値は十分に生じ得ると考えられ、このことよりガリ頭部が上流に向かって分岐する過程が不安定性によって

生じている可能性が示された。

7. 結論

本研究では宗谷丘陵を対象として地形図を用いたガリ断面の地形変化による具体的なガリの発達過程についての考察と生産土砂量の算出、そしてガリ頭部における現地調査および考察を行った。その結果、次のようなことが明らかになった。

- (1) ガリ頭部周辺では表面流により上流方向へと侵食、分岐が発生するのに対し、下流では横方向に侵食が発生する。
- (2) ガリの単位面積当たりの年間生産土砂量は約 60 mm/year と算出された。
- (3) ガリの発達過程においては降雨時に発生する表面流の侵食作用だけではなく、非降雨時にガリ底部に湧出する地下水流の侵食作用も重要であることが示唆された。

今回対象とした宗谷丘陵は周氷河地形と呼ばれる凍結融解作用による影響が著しく、侵食されやすい地形であった。したがって、ここで明らかになったガリの発達過程は凍結融解作用が著しい高緯度や標高の高い地域に特有であると考えられる。さらに侵食のされやすさは地表の粘性や地質的、地形的条件によって異なる。そのため地域によってガリの発達過程は異なると考えられる。したがって、他の地域についても調査を行ない、より一般的なガリの発達過程と生産土砂量を明らかにする必要がある。

謝辞： 本研究は（財）北海道河川防災研究センターの研究助成を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉川秀夫: 流砂の水理学, 丸善, p. 345-347, 1985
- 2) 貝塚爽平, 太田陽子, 小嶋 尚, 小池一之, 野上道男, 町田 洋, 米倉伸之: 写真と図で見る地形学, 東京大学出版会, p.110, 1985
- 3) 小嶋 尚, 野上道男, 小野有五, 平川一臣: 日本の地形 2 北海道, 東京大学出版会, pp.42-43, 2003
- 4) H.M.French: 周氷河環境 (小野有五訳), 古今書院, p.441, 1984
- 5) 島田典和, 泉 典洋: 侵食性河床におけるステップの発生に関する実験, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.967-972, 2004
- 6) 小野寺弘道: 積雪地帯の山地浸食防止に関する基礎的研究, 北海道大学農学部演習林研究報告, Vol. 36-2, pp.225-316, 1978
- 7) 土木学会編: 水理公式集, pp.139-140
- 8) 泉 典洋: 水路の分岐について, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.979-984, 2005

(2005.9.30 受付)