

玉川上水における法面の非対称とその成因

小泉武栄¹・伊東敦子²

Cause of the Asymmetry in Trench Profile of the Tamagawa Josui Canal in the Western Tokyo District

Takeei KOIZUMI¹ and Atsuko ITO²

Abstract

The Tamagawa Josui Canal was excavated in the early Edo period to conduct city water from the Tama River to Edo. In this canal there is a conspicuous asymmetry in slope morphology between both banks. That is, the left bank has steep cliff while the right bank has gradual slope with short cliff on upper part of the bank. To elucidate the cause and the forming process of the asymmetrical slope morphology, we investigated geomorphic surface process on each bank. During January 11th to December 24th in 2003, we set up traps on each bank and weighed monthly the volume of debris fallen down from upper part of the slopes.

According to longitudinal measurement of debris volume, failure of soil surface occurs throughout the year on the slope of the both banks, though total amount of debris production on the left bank were twice as high as that on the right bank. Amount of debris in winter season was 9.7 times higher than in summer season. Especially from January to March, debris was intensively produced on the right bank. Debris production was evident to be induced by needle ice.

Geomorphic surface processes on the north-facing right bank are as follows. In winter season, frost columns are formed on the surface of Kanto Loam (volcanic ash sediment) under low soil temperature and high soil moisture. A few days later, when needle ice melt, small grains are left on the surface of Kanto Loam. Grains are eventually carried down by the rainfall or winds to lower part of the slope. As a result, cliffs on upper part of the bank retreat and gentle slopes of the lower part expand.

On the south-facing left bank, debris production is little throughout the year. On this bank, cliffs are so dried up in winter because of rich sunshine that needle ice don't arise even air temperature fell down under the freezing point. Instead, many cracks arise lengthways and blocks of soil fall down in occasion of heavy rain. In this way, the cliff retreats with its vertical shape.

The Tamagawa Josui Canal is supposed to have maintained its original form

2010年5月14日受付, 2010年10月14日改稿, 2010年10月18日受理

¹ 東京学芸大学地理学研究室

¹ Department of Geography, Tokyo Gakugei University, Tokyo 184-8501, Japan

² 早稲田実業学校 中・高等部

² Waseda Jitugyo Junior and Senior High School

when it had been brimmed with water, from the construction time till 1965 when water flow stopped by the disuse because of completion of filtration plant. After water flow was stopped and canal became to be dried up, asymmetry of the trench profile has been formed.

Key words: *Tamagawa Josui Canal, asymmetry of trench profile, asymmetrical valley, frost action, needle ice, toppling*

1. はじめに

玉川上水は、江戸時代の初期に江戸城下への給水を目的として人工的に開鑿された用水である。上水は武蔵野台地を東西に縦断しているが、その流路では大半の場所で、切り立った左岸（南向き法面）と、垂直な崖の下になだらかな斜面が続く右岸（北向き法面）といった、非対称の断面形が見られる（Fig. 2）。以下、これを非対称法面と呼ぶ。玉川上



Fig. 1. Study area.



Fig. 2. Asymmetrical slope form of the Tamagawa Josui Canal. Sunny cliff is south-facing left bank and slope in shadow is north-facing right bank.

水の非対称法面は、地形学的には小規模ではあるが非対称谷の一種と考えられる。非対称谷については、わが国では岩田（1977）が根釧原野から報告した事例があり、貝塚（1964）は関東地方の台地を刻む谷に普通にみられると述べた。また世界各地からもさまざまな事例が報告されている（たとえば、Embleton, 1984）。

非対称谷を形成する主な原因として、地盤の運動、基盤岩石の組織、気候の3つがあげられている（岩田, 1977）。関東地方の非対称谷の成因については、地盤傾動による川の側方移動（東木, 1928）や、霜柱消長の影響（貝塚, 1964）などの説がある。このうち最も有力視されているのは貝塚の霜柱説であるが、これは観測によって実証されたものではなく、推測による仮説の段階にとどまっている。

霜柱は、日本では初冬から早春にかけて身近にみられる現象である。特に武蔵野台地においては発達が顕著なため古くから注目され、発生過程や形成機構に関して多くの研究がなされてきた（たとえば藤田ほか, 1937, 1940）。しかし霜柱のもたらす地形形成作用についての研究例は、小野（1978）の研究を見る程度で極めて少なく、小野は霜柱による斜面物質移動に関する基礎的なデータ蓄積の必要性を指摘している。

本研究では、玉川上水の非対称法面において崩落の実態調査を行い、それに基づいて非対称性法面の成因と形成過程について考察した。

2. 調査地域の概要

玉川上水は、多摩川に設けられた羽村堰（羽村市羽東）から四谷大木戸（新宿区四谷）までの約 43 km をほぼ東西に走る人工水路である。関東ローム層が厚く覆う武蔵野台地の分水嶺に沿って流れており、始終点の標高差は約 92 m（平均勾配約 0.2%）である。

工事は徳川幕府の命によって始まり、二度の失敗を重ねながらも、1653年にわずか7ヶ月余りの工期で完成したという（榮森, 1989）。上水完成後は野火止用水などいくつかの分水が設けられ、新田開発のために水が分けられたが、その主要な役割は変わらず、明治時代中頃に至るまで水道用の水が満々と流れていた。しかし1901年には水道用としての使命が終焉し、さらに1965年淀橋浄水場の廃止によって、小平監視所から下流では水流がなくなった。

この区間の枯渇用水路にふたたび水流が戻ったのは、21年後の1986年である。これは東京都が清流復活事業として下水処理水を流すようにしたためで、以後、その状態のまま現在に至っている。しかしその水量は毎秒数立方メートルとわずか（水深は40 cm程度）、明治期までの豊かな水量とは比較にならない。なお、玉川上水は人工的な素掘り水路として、2003年8月に国の史跡（歴史的土木遺産）に指定された。上水兩岸には緑が多く、遊歩道が整備されている。

玉川上水では近年、法面崩落、特に右岸の北向き法面の崩落が進み、安全性や水路としての機能、文化財としての価値の低下が大きな問題となった。崩壊地状になったところが

各地に生じ、特に右岸では、上部に生育する落葉広葉樹が、法面後退のために根元の土壌が侵食され、上水の内側に向かって傾きながら法面にへばりついているものが目立つようになった。そして時には自重を支えきれずに、水路側に倒れるものも現れた。この問題に対処するために、平成 11 年度には小平監視所から笹塚橋までの法面崩落調査が東京都により実施され、崩落についての基礎的データが得られている（東京都環境保全局自然保護部、1999、2000；佐藤ほか、2003）。

本研究では、崩落が発生している区間のうち、非対称法面の発達が顕著な寺橋付近（小平市上水新町、朝鮮大学校南方）を調査地に選んだ（Fig. 1）。この付近の上水は、武蔵野 I 面（貝塚、1964）を掘り込んでおり、開鑿部分の断面には武蔵野ローム層と立川ローム層が露出している。また水路の兩岸の肩の部分は樹木に覆われ、高木層にはイヌシデ、クヌギ、コナラ、エゴノキなどの落葉広葉樹が優占している。また林床にはガマズミ、ヤマブキなどの低木やヒメカンスゲなどの草本が生育している。

3. 調査方法

1) 気象関係の調査

法面の崩落と気象条件との関連を検討するために、関係があると考えられる気象データを集めた。出所等は以下の通り。①気温 調査地に最も近い観測所である気象庁府中観測所のデータを使用した。②降水量 同じく、気象庁府中観測所のデータを使用した。③日照時間 同じく、気象庁府中観測所のデータを使用した。これに加え、月末調査時に毎回撮影した写真をもとに、照度の季節変化を考察した。④地温 調査地兩岸の法面の上部と下部に自記温度計（機器名：おんどとり jr.）を設置した。センサーは地中 1 cm に埋設した。計測期間は 2003 年 1 月 11 日から 2003 年 12 月 24 日までの計 348 日。計測間隔は 1 時間である。

2) 崩落に関する調査

崩落量・含水比などを定期的に計測するために、各月末に現地調査を行った。調査期間は 2003 年 1 月 11 日から 12 月 24 日までで、調査日と調査間隔は Table 1 の通りである。

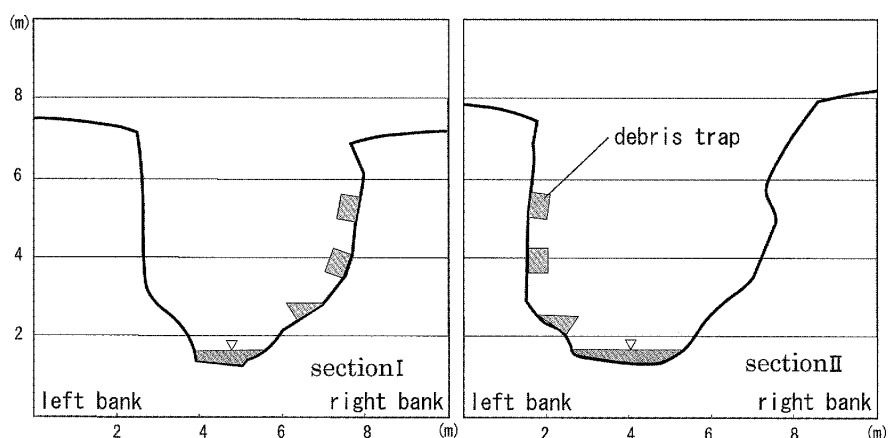
①崩落土の重量

右岸と左岸による違いを比較するため、水路内で代表的な形態を示す法面を選び、2 m ほど間隔を明けて断面 I と断面 II を設置し、断面形を測量した。また崩落土を受けとめるために、高さ 7 m ほどある法面にトラップを設置した（Fig. 3）。右岸の法面には断面 I、II と形態の違う、崩落の激しい法面があるので、そこに断面 III を設置した。左岸は連続した垂直法面で傾斜や形態に大きな差がないが、崩落量を兩岸において 2 断面ずつ計測するために、断面 IV を設置した。

各断面にはおよそ 1.5 m 間隔でトラップを 3 個設置した。うち 2 個は上部の崖につけ、残りの 1 つは下部の斜面に置いた。上部・中部のトラップは、幅 30 cm、奥行き 17 cm、高

Table 1. Dates of investigation and observation in 2003.

month	date of Investigation	Actual period of Investigation	Total days
January	1/25	1/11 ~ 1/25	15
February	2/28	1/26 ~ 2/28	34
March	3/30	3/1 ~ 3/30	30
April	4/27	3/31 ~ 4/27	28
May	5/31	4/28 ~ 5/31	34
June	6/30	6/1 ~ 6/30	30
July	7/25	7/1 ~ 7/25	25
August	8/28	7/26 ~ 8/28	33
September	9/23	8/29 ~ 9/23	26
October	10/30	9/24 ~ 10/30	37
November	11/24	10/31 ~ 11/24	25
December	12/24	11/25 ~ 12/24	29

**Fig. 3.** Cross sections of the canal and locations of debris traps.
Left: section I, Right: section II

さ 26 cm の箱型トラップである。下部には幅 50 cm、奥行き 50 cm、高さ 26 cm のちりとり型トラップを設置した。

トラップには土嚢袋をつけ、各月の調査日にこの袋を回収した。回収した崩落土から木の枝、落ち葉などを取り除き 110℃ の乾燥炉に 24 時間おいて水分を除き、乾重量を崩落量として計測した。

②含水比調査

月末調査時に調査地法面の上部・下部 2 カ所、両岸で合計 4 カ所の土を採集した。土は 110℃ の乾燥炉に 24 時間入れ、乾湿重量の差から含水比を計算した。計算式を以下に表わす（土質試験法編集委員会、1990）。

$$\text{含水比 (\%)} = (\text{湿潤試料} - \text{炉乾燥試料}) \div \text{炉乾燥試料} \times 100$$

4. 調査結果

1) 気象データ

- ①気温 年変化も日々の変化も大きいですが、冬が寒いのが特徴的である。冬季の12-3月は日最低気温の月平均が0℃を下回っている。後で述べるように、法面の侵食には冬場の気温の変化が重要なので、一例としてFig. 4に2003年1月の気温の日変化を示した。気温は1週間程度の周期で変化しているが、最低気温が0℃を下回る日が月の半分以上に達する。
- ②降水量 太平洋側気候のため、夏に降水量が多く、冬は少ない。2003年の月積算降水量は、2月が41 mmと最小であり、8月に312 mmと最大を記録した。
- ③日照時間 1月に最大、7月に最小を記録した (Fig. 5)。年間を通してみると、12-3月の冬季に日照時間が多くなっている。

なお月末調査時に毎回記録した写真をみると、両岸に生える落葉樹の葉の繁茂状態が季節によって変化し、上水法面の照度に大きな影響を与えていることがわかる。葉の落ちる12-3月には、左岸法面に日が良く当たっていた。しかし4月から葉が付き始め、

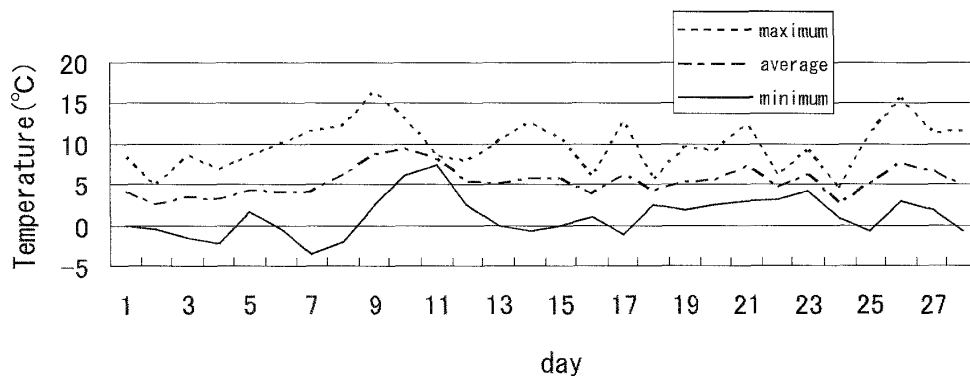


Fig. 4. Air temperature on January 2003 in Fuchu.

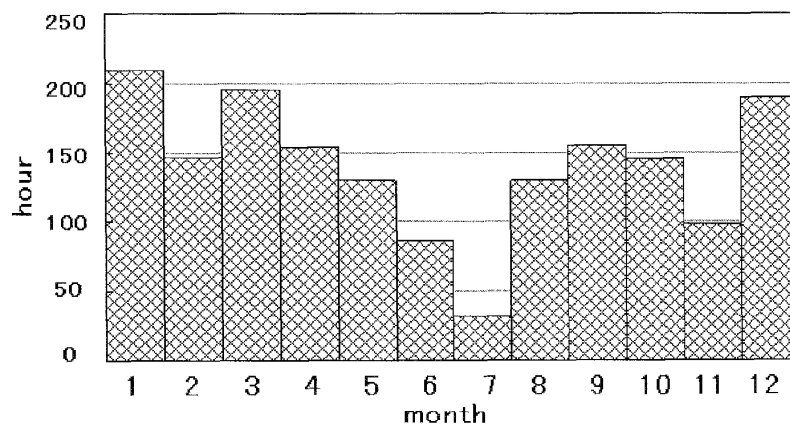


Fig. 5. Monthly change of daylight hours of 2003 in Fuchu.

夏になると葉が生い茂って、屋根のような役割を果たし、日射や降水をさえぎっていた。したがって調査地における日照時間は、Fig. 4に示した府中観測所での変化以上に季節変化が大きいと思われる。

④地温 地温の季節変化をみると、右岸と左岸で違いが大きく、違いは冬場に顕著に表れた (Fig. 6-A, B)。2003年2月の地温をみると、南に向いている左岸では、日最高地温は冬であるにも拘わらず、しばしば15℃から18℃まで上昇している。また最低地温も3℃前後で推移している。これに対し、北向きの右岸では日最高気温は6℃前後と変化に乏しく、最低地温も0℃から1℃くらいで安定している。これは左岸では日射がよく当たるのに対し、右岸側では全然当たらないという日射条件の違いを反映したものであろう。

⑤霜柱が発生した日 土壌温度と観察記録から、霜柱が発生した日を算出した。たとえば2月1日には霜柱を観察できたが、この日は、地温はマイナスにはならず、0.3-0.4℃で霜柱が発生していた。この事例からみると、最低気温が0℃以下に下がり、深夜から朝方にかけて地温が0.4℃以下になれば、霜柱ができると推定できる。そこで以上の条件を満たす日を霜柱発生日と算出した。それによると、1月(11日以降、月末まで)に8回、2月に6回、3月に5回、霜柱が発生したと考えられる。その日を以下に示す。

2003年1月 15, 16, 17, 22, 25, 26, 30, 31日

2003年2月 1, 2, 3, 4, 7, 28日

2003年3月 5, 10, 11, 12, 13日

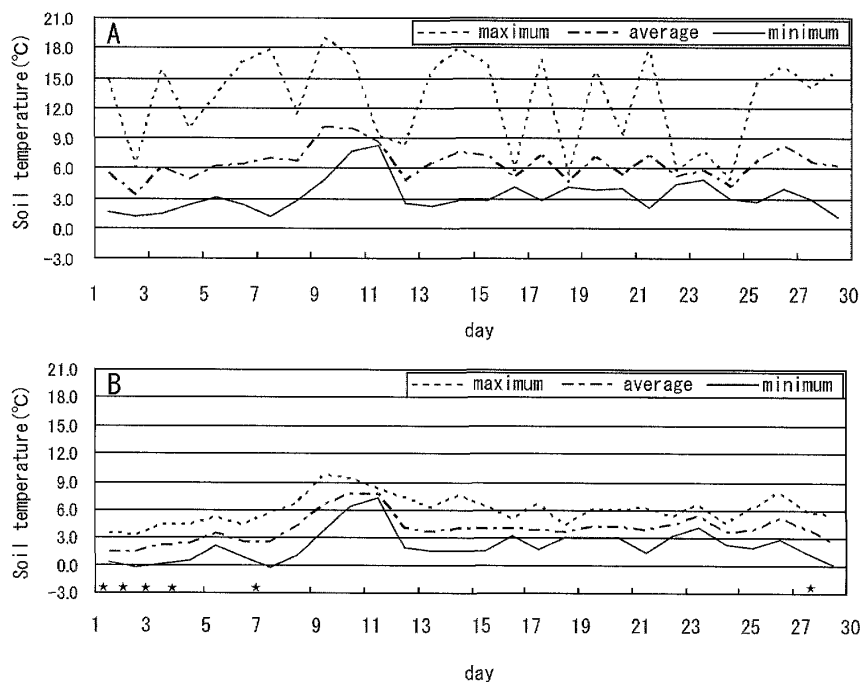


Fig. 6. Change of soil temperature on February in 2003.

A: left bank, B: right bank

★ Date of occurrence of needle ice

2) 含水比

関東ロームの自然含水比は80～150%であり、通常は100%以上となるのが普通である(土質試験法編集委員会 1990)。しかし今回採取した土は表層から回収したため、100%を下回ったケースが少なくなかった。

調査地法面の含水比には、年変動がみられた (Fig. 7)。すなわち、冬期には含水比は低く、夏期には高い傾向が現れた。左右両岸で比較すると、全体的に左岸の方が低く、乾燥していることがわかる。法面の上下を比べると、上部の方が乾燥していた。

3) 崩落量

①崩落量の季節変化

崩落量の計測結果を Fig. 8 に示す。測定日の間隔が一定でなく、単純な比較ができないので、月末の回収崩落量を調査期間の日数で割り、各測定日間の日平均の崩落量 (DA =

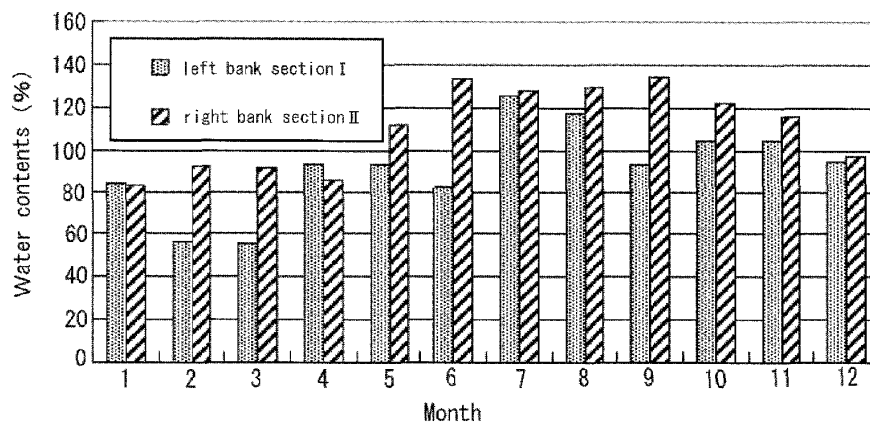


Fig. 7. Monthly change of the water contents on both banks.

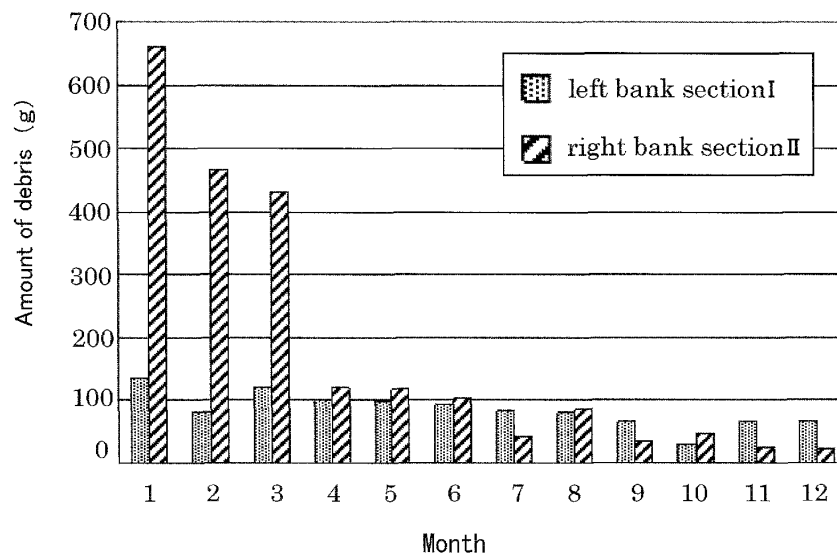


Fig. 8. Monthly changes of amount of debris on both banks.

day average) を算出した。月別の比較には、日平均値 (DA) を各月の日数分積算した値を使用した。崩落量の総量 (1月から12月までの計348日) については、断面Ⅰと断面Ⅱにおいて左右両岸の比較を行った。崩落量は左岸の1024.42 g (DA 2.87 g) に対して、右岸は2154.43 g (DA 6.05 g) となり、右岸が左岸のほぼ2倍に達した。

左岸の崩落期はDAの値から1-6月と7-12月の2つに分けられ、1-6月 (総量630.77 g, DA 3.41 g) が、崩落量がやや多い傾向にある。7-12月 (総量393.65 g, DA 2.18 g) は崩落量が少ないが、そのなかでは降水量が最も大きい7、8月の崩落量がやや多い。7-9月にかけては土塊の崩落も観察された。

右岸の崩落期は、DAから1-3月と4-6月、7-9月、10-12月の4つに分けられ、期間ごとの変化が大きい。1-3月は崩落量が非常に大きく (総量1558.33 g, DA 17.77 g)、DAが最大の1月 (DA 22.41 g) は最小の11月 (DA 0.82 g) の27倍に達した。4-6月には崩落量は急減し (総量343.44 g, DA 3.78 g)、左岸の値に近くなった。7-9月 (総量160.3 g, DA 1.63 g) は逆に左岸よりも少なくなるが、8月の崩落量 (DA 2.92 g) のみ左岸同様に大きい。10-12月 (総量92.36 g, DA 1.02 g) は、4つの期間の中で一番崩落が少ない。冬期の崩落量を夏期の崩落量と比べると、前者は後者の9.7倍に達した。

②法面の各部位ごとの崩落割合の変化

次に、右岸の断面Ⅲで発生した崩落の総量を、断面の上・中・下の各部位に分けて比較した (Fig. 9)。全体的には下部の崩落が激しいが、季節ごとに崩落の仕方に変化がみられた。1月から4月にかけてと8月・9月は、下部の崩落が激しく、全体の60%以上を占めた。下部、上部、中部の順に崩落の割合が大きかった。5月・6月は上部の崩落量が約40%以上を占めた。9-11月は下部が約50%、中部が約25%と、下部・中部・上部の順に崩落量が大きかった。

同様に、左岸の断面Ⅳにおける崩落量を、断面の上・中・下の各部位に分けて比較した (Fig. 10)。全体的に下部の崩落が激しく、下部・上部・中部の順に崩落量が大きかった。年

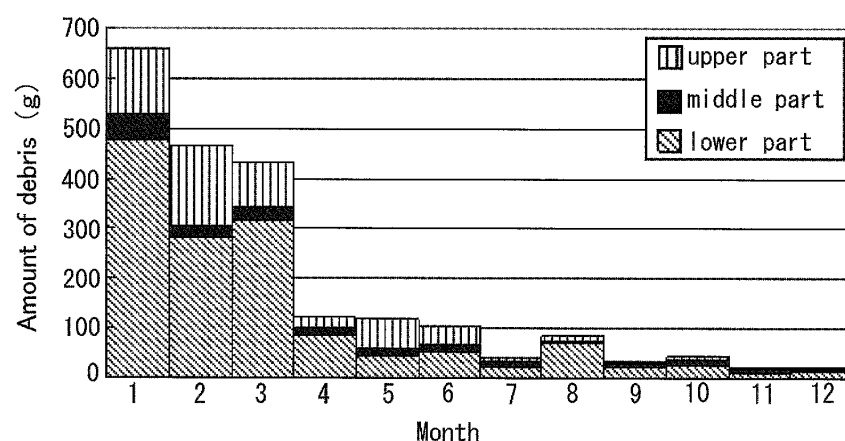


Fig. 9. Ratio of debris production in three parts of right bank (section III).

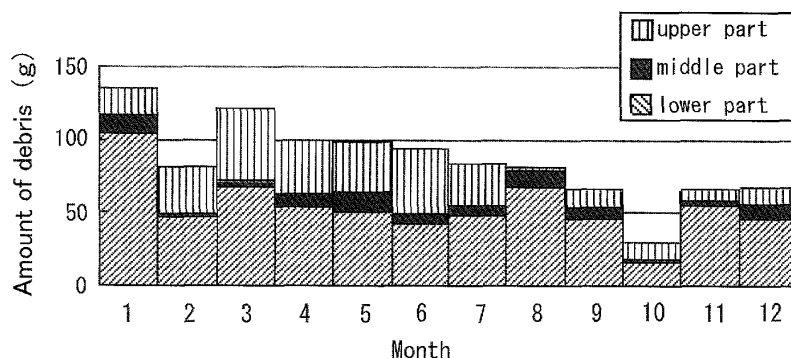


Fig. 10. Ratio of debris production in three parts of left bank (section IV).

間を通して下部の崩落の割合は50%以上であるが、1-7月にかけては上部の崩落の割合も30~40%と大きかった。8-9月にかけて、調査断面付近で幅数10cmのブロックが崩落したのを観察した。

5. 考 察

1) 法面崩落の原因

以上の調査結果をまとめると、①左岸では年間を通して崩壊がコンスタントに発生するが、1-3月にやや多い、②右岸では崩壊量は季節変動が大きく、1-3月に最大、10-12月に最小となる、③7-9月は崩壊量が全体として少な目だが、8月は両岸ともやや多い、という傾向が明らかになった。

右岸側の崩落量が左岸側の約2倍あることから、法面の後退速度も、右岸が左岸の約2倍に達すると考えられる。このような法面崩落に関わる要因として、降水、気温、地温、風、日照、霜柱による凍結融解などが想定できる。以下ではこれらと崩落量との関連を検討する。

①法面崩落と降水量の関係

崩落量と降水量との相関関係を調べたところ、1-3月にかけて、右岸の崩落は降水量と無相関（相関係数=0.0635）であった。しかし7-12月には右岸・左岸ともやや相関が表れ、特に7-9月の右岸の崩落には降水量との相関が明確にみられた（相関係数=0.997）。以上のことから、1-3月にかけてみられる右岸の非常に大きな崩落は、降水量とは関係がないこと、また、7-12月にかけての法面崩落は、右岸・左岸ともに降水量が原因の一つであること、の2点が明らかになった。

②法面崩落と地温との関係

冬季の地温は、すでに述べたように、法面が左岸か右岸かで大きな違いがある。すなわち、左岸は南向き法面であるため、日射がよく当たり、冬季には気温に左右されずに18℃程度まで上昇する。また最低地温は0℃以下にはならず、1℃前後までしか下がらない。一

方、右岸は北向きで日射の影響を受けにくく、気温に比例して地中温度が変化する。最低地温は 0°C を前後し、霜柱の発生に都合のいい条件となっていた。このように右岸左岸の地温の違いは崩落量に密接に関係している。

崩落量と月別最低気温とを対応させたところ、1-3月期の右岸の崩落は最低温度との強い相関がみられた(相関係数=0.9998)。冬季における右岸の顕著な崩落は、気温の低下とともに崩落量が増加することから、霜柱の形成と凍結融解による表層粒子の剥離が大きな要因になっていると考える。

③霜柱の形成

霜柱は、関東ローム層のように、内部に毛細管現象の発生に適した細長いパイプが無数にあり、粗い粒子と粘土のような細かい粒子とが半分ずつ混合した状態(土壌学ではこれをロームと呼んでいる)で最も成長しやすい(藤田ほか, 1937, 1938)。また気温が 0.3°C より低く、含水量が25%以上で発生する(大後, 1948)。調査地の地質は関東ロームから成り、気温・地温の条件も霜柱の立ちやすいものとなっている。

冬季の調査時には、霜柱の発生と融解を何回も観察した。霜柱は右岸の法面全体に発生していたが、特に下部で顕著であった。左岸では水路に接する法面下部で発生していたが、法面の上部・中部にはみられなかった。この場合、温度条件は十分でも土壌水分が足りないため、霜柱はできないと推定できる。

一般に夜間から早朝にかけて発生した霜柱は、昼間になると少しずつ溶けていき、午後には消滅する。関東ローム層の特性として、一度凍上をおこすと粒子が分離し、著しく軟弱化する(関東ローム研究グループ, 1965)。そのため、法面上で凍結融解によって分離し軟弱化した表層の土壌粒子は、降水や風によって流亡しやすいと考えられる。

2) 法面の後退プロセス

右岸での崩落を観察すると、左岸のように塊で崩落するということはほとんどなく、冬季には霜柱の発生と融解によって法面表層の粒子が少しずつ剥離し、ぼろぼろと崩れるのが始まりである。崩落した物質は下部の斜面上に薄く堆積しているが、きわめて不安定で、崩れやすい。この状態は、4月以降にはほとんどみられなくなり、斜面上の二次堆積物は降水や風によって流され、下部斜面ではローム層が露出して表面はつるつるになった。

左岸では量は少ないが、年間を通してコンスタントに崩壊がおこった。よくみられるのは、法面からはがれた柱状または板状の土層が、その下端部を支点として前方に回転しながら転落する、垂直剥離である。乾燥によってローム層の上部に縦方向にヒビ割れが生じ、それが剥離のきっかけになっているように見える。

左岸、右岸で卓越している斜面後退のプロセスを Fig. 11 に模式的に示した。

左岸側ではこの他、豪雨の後など不特定の時期に、大きな土塊が垂直剥離によって一気に崩落したのも観察した。剥離の発生した跡にしばしば木の根がみられることから、ローム層中に入り込んだ木の根が周囲のローム層を押し広げ、そこから根を伝わって雨水が浸

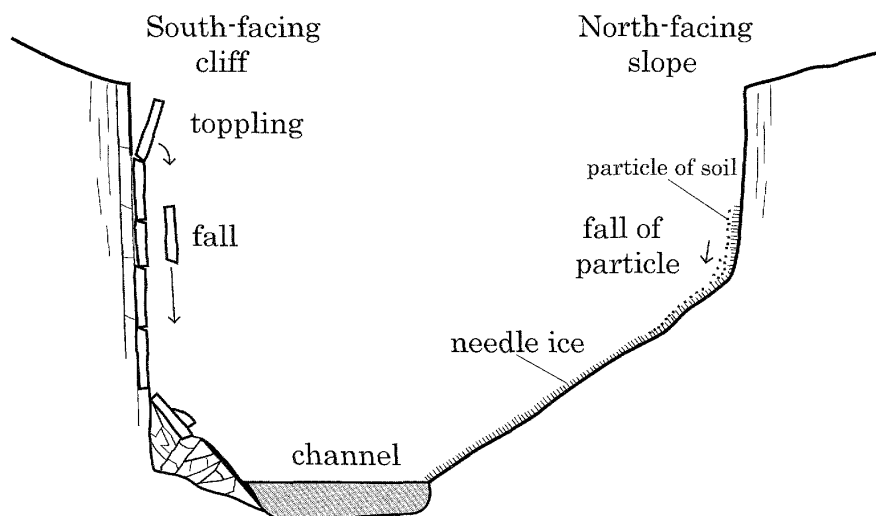


Fig. 11. Difference of geomorphic process on each bank. (schema)

入し、豪雨の際に外側の部分が崩れるきっかけになっている可能性が高い。

3) 玉川上水の空堀化と非対称法面の形成

玉川上水では1965年、水量に大きな変化があった。それ以前の上水道として利用されていた時期には、上水は法面上部まで水で満たされていて、現在のような法面の崩落は発生しないため、上水の断面形は建設当初に近い状態を保っていたと考えられる。しかし1965年、淀橋浄水場の廃止によって水が流れなくなり、空堀の状態が続くようになると、状況は一変し、霜柱による侵食や、崩落による法面の後退が始まった。これにより断面は広がると同時に、非対称になり始めた。その後、40年余りが経過し、現在のような顕著な非対称法面が形成された。今後も侵食は継続するが、北向き法面上部の崖が後退し、下部の緩斜面が伸びて法面上部にまで達すれば、侵食は収まり、安定化するだろうと想定できる。

なお1986年からは東京都の清流復活事業により、空堀だった玉川上水に下水処理水等を活用した水が流れ始める。これによって、法面の下部に湿り気が生じ、右岸側では霜柱が立ちやすい条件になった。このため、それ以降、侵食が加速した可能性が高い。

6. ま と め

玉川上水では、切り立った左岸（南向き法面）と、崖の下になだらかな斜面が続く右岸（北向き法面）といった、非対称の断面が連続して見られる。本研究では、この非対称法面を対象に、崩落の実態調査を行い、非対称法面の成因と形成過程について考察した。結果は以下の通り。

- ①崩落は兩岸において年間を通じて起こっているが、左岸と右岸を比べると、右岸での崩落量が左岸の2倍に達した。

- ②崩落は1月から3月にかけての冬期に右岸側に集中して発生した。これは霜柱の発生とその融解によるものである。
- ③右岸側での冬期の崩落量は非常に大きく、夏期の降水による崩落と比べると9.7倍に達した。霜柱の働きは降水や風などと比べて非常に大きな営力となっている。
- ④右岸での崩壊プロセスは以下のものである。まず冬期に水分量の多い法面下部から中部にかけて霜柱が発生し、それが融解することによって、関東ローム層の表層がぼろぼろと崩れる。次に降水や風によって分離した土壌粒子が除去される。その結果、垂直法面は後退し、下部の緩斜面が拡大する。なお上部は水分量が少ないため、夏場に豪雨に伴う垂直剥離によって後退することもある。
- ⑤左岸での地形変化プロセスは以下のものである。南に面しているので冬場を中心に日射がよくあたり、法面の上部・中部では関東ローム層が乾燥して縦にヒビ割れが生じる。それがきっかけになって、土の垂直的な剥離が生じ、その部分が豪雨の際などに剥片または土塊となって崩落し、法面は垂直のまま後退する。樹木の根の侵入が土塊の剥離の原因になっている場合もある。
- ⑥玉川上水は上水道として利用されていた時期には、法面上部まで満水状態であり、上水の断面は建設当初に近い箱型の状態を保っていたと考えられる。1965年淀橋浄水場の廃止によって水が流れなくなり、空堀の状態が続くようになると、霜柱による侵食や、崩落による法面の後退が起り、非対称法面の形成が始まった。その後、清流復活事業でわずかではあるが流水が復活すると、ローム層の下部に湿り気が生じ、霜柱がよく発生するようになって、法面での侵食が加速したとみられる。その後、約40年が経過し、断面は広がると同時に、現在のような顕著な非対称法面が形成された。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、東京学芸大学自然地理ゼミの皆さんには、現地調査から論文執筆まで多面に涉るご協力を頂いた。以下にお名前をあげて感謝の印としたい。徳竹真人氏、池田明彦氏、辻村千尋氏、酒井啓氏、藤森美佐枝氏、松永光平氏、李景仙氏、石田千鶴氏、片桐一樹氏、佐藤安泉氏、鈴木菜奈子氏、林聡子氏、石川温之氏、銚谷寿一氏、増沢有葉氏、和田美貴代氏、佐々木夏来氏、福地慶大氏。

調査にあたっては、東京都水道局の方々に便宜を図って頂いた。佐藤 力氏（愛植物設計事務所）には崩落量調査のトラップを提供していただき、設置の手伝いをして頂いた。竹本幸弘氏には調査地で貴重な御助言を頂いた。吉田直隆氏には測量の指導をして頂いた。以上の方々に、心からお礼を申し上げます。

引用文献

- 大後美保 (1948) 「農業気象通論」, 養賢堂.
- 土質試験法 (第3回改訂版) 編集委員会 (1990) 「土質試験の方法と解説」, 土質工学会
- Embleton, C. ed. (1984): *Landforms in Europe*: Macmillan Publishers, London.
- 藤田ミチほか (1937) 「霜柱の研究 その1」, 自由学園新聞出版部, 44 p.
- 藤田ミチほか (1940) 「霜柱の研究 その2」, 自由学園新聞出版部, 17 p.
- 岩田修二 (1977) 根釧原野, 上春別付近の周氷河非対称谷: 地理学評論, 50, 455-470.
- 貝塚爽平 (1964) 「東京の自然史」, 紀伊国屋書店.
- 関東ローム研究グループ (1965) 「関東ローム」, 築地書館.
- 小野有五 (1978) 周氷河営力としての霜柱: 筑波大学水理実験センター報告, No. 2, 47-55.
- 榮森康治郎 (1989) 「江戸東京 水を求めて四〇〇年」, TOTO 出版.
- 佐藤 力・大塚生美・趙 賢一・小泉武栄 (2003) 東京都玉川上水の水路法面崩壊と樹木管理に関する研究: 環境情報科学論文集, 17, 13-16.
- 東木龍七 (1928) 東京山の手地域における侵食面の発達史. 地理学評論, 4, 111-120.
- 東京都環境保全局自然保護部 (1999) 「平成9年度 玉川上水緑の保全計画検討委託報告書」, 株式会社愛植物設計事務所.
- 東京都環境保全局自然保護部 (2000) 「平成11年度 玉川上水の法面崩落防止委託報告書」, 株式会社愛植物設計事務所.