

## 土壤表層浸透能の物理的構成と植生（3）

誌名	水利科学
ISSN	00394858
著者名	竹下,敬司
発行元	水利科学研究所
巻/号	318号
掲載ページ	p. 51-67
発行年月	2011年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# 土壤表層浸透能の物理的構成と植生（Ⅲ）

竹 下 敬 司

---

## 目 次

- 0 雲仙火砕流荒廃地での土砂災害の消長と浸透能との対応を題材にして
- I 浸透能と水源涵養・土砂災害
  - 1 土壤の水源涵養機能と土壤孔隙構造
  - 2 土壤の水調節機能の概念
  - 3 土壤層内に分布する孔隙構造と貯留機能
  - 4 土壤表層における孔隙構造と浸透能の関係および土壤侵食
  - 5 新生火山灰がもたらす低浸透能と土砂災害
  - 6 草本植生の生育に伴う表層浸透能の向上と土石流災害の終息

（以上 No. 316に掲載）
- II 土壤表層の浸透構造と植生との物理的關係
  - 1 土壤表層浸透能の定量的把握の背景
  - 2 土壤表層浸透能の測定と環境特性
  - 3 浸透能曲線上における降水強度と孔隙構造、植生構成との関係（実験）
  - 4 基本浸透能  $I_{bo}$  と分岐後の浸透能曲線  $I_o$  との背景となる物理的構成
  - 5 実質浸透能に関連する植生構成と円筒枠浸透能（作業仮説と説明変量）
  - 6 浸透能実験と結果

（以上 No. 317に掲載）
- III 土壤表層部において構成を異にする植生・孔隙条件下での表層浸透能

- 1 土壤表層浸透能に関わる植生の機能
- 2 草本植生下（荒廃地）における表層浸透能  
（以上本号 No. 318に掲載）

（以下次号以降に掲載）

- 3 森林土壌（森林造成）の評価
  - 4 土壌層内構成：層内浸透と貯留
  - 5 森林土壌の表層浸透能と層内貯留構成
  - 6 土壌組成，堆積構成と土壌機能との総合的関係と評価
- IV 森林土壌の水源涵養機能構造の総括的見方
- 1 土壌孔隙の造成過程
  - 2 土壌孔隙の造成保全と腐植
  - 3 土壌の浸透・貯留の物理的構成

### III 土壤表層部において構成を異にする植生・孔隙条件下での表層浸透能

#### 1 土壤表層浸透能に関わる植生の機能

これまでの検討結果として，土壤表層浸透能に関わる植生の機能は大略，次の4種に区分される。

##### 1) 土壤表層での基本浸透能の孔隙構造を造成する機能

土壤層内での孔隙造成は，単に，植物根系の伸長・肥大・高密度化・枯死の繰り返し等の植物活動だけが機能しているわけではなく，植物腐植を含有する土壤層内に生息する植物・動物・微生物等の生態系が発揮する共同的耕運機能によるものである。時間的に分けて観察すると土壤内での腐植含有率が低く，構造の発達がない段階では植物だけの活動が顕著であるが，その後腐植層の形成・熟成が進んでくると植物以外の動物等との協働活動に移行しているのが実態である。そして，これらの造構造機能は当初は表層部に限られていたが，森林状態への移行と共に土壤の中下層でも稼働して，涵養機能の中核とも言うべ

き貯留構造の造成，修復にも寄与するようになる。腐植もない初期段階の未熟土壤が孔隙性の豊かな土壤に変身するまでは，低浸透能環境下でも土壤侵食を発生しないような抵抗性の高い環境つくりと，孔隙造成，養分に富む腐植層造りを順序だてて平行的に進行させることが必要となっている。

#### 2) 表層に造成された孔隙構造を雨滴衝撃・表面流等の破壊から守る保護機能

落葉層と下草茎葉との共同によって雨滴衝撃を遮断し，また，落葉・下草の抵抗によって表面流速を弱め，土壤の浸透構造を保護している。雨滴衝撃からの保護には落葉層等による被覆率が100%に近いことが望まれている。被覆率に綻びがあるとその部分に発生した表面流によって，下流部での構造破壊が発生する危険性があるからである。このような破壊影響の周囲への波及を考慮すると，20～30%の被覆があっても機能はゼロに等しいといった酷評がなされることが少なくない。落葉層は風等によって移動する不安定な被覆物である。とくに傾斜地では不安定であり，往々裸出面を出現させている。落葉層の被覆率を100%近くにまで高く維持するためには，落葉層に対しての目釘の作用や落葉層を土壤表層に縫い付ける作用が必要である。この役割を草本類，灌木類の茎（密度）と表層に分布する細根が果たしている。実質的な保護機能を果たしているのは落葉層であるが，管理要因としては落葉を安定させる下草，灌木の茎密度，被覆率が重視されている。

#### 3) 雨滴衝撃で破壊された表層孔隙構造を修復する機能

一時的でも落葉被覆が破れると，降雨時には雨滴衝撃を受けて土壤表層の構造が破壊され浸透能は低下する。これを放置すると荒廃に移行する危険性も高い。このような悪事態に陥ることを回避し，浸透能の向上を持続するためには破壊部分を急速に修復することが必要である。この役割を草地では高密度の草本類の根系（高頻度で更新して孔隙造成と腐植供給）が果たし，森林では腐植層に棲息する動（植）物が担っている。因みに大型の林木自身は，このような小回りの利く機能が小さいものと見てよい。

#### 4) 表面流速に抵抗して，水を停滞させ，潜在浸透能の活用率を高める機能

地表には土砂粒子あるいは団粒子が形成する微細な凹凸と，植物の茎葉，根

系の分布によって形成される凹凸があり、これらによって表面水が停滞させられ、部分的にせよ冠水部分が出現する。そこでは表面流出が抑止されるので、浸透が優先的に作動する環境が形成される。引き続き降水強度が増大すると停滞水面が連続し、側方流出回路が形成される。浸透流出と表面流出との並列2回路が作動を開始する。植生の抵抗によって、側方流出の流速（流量）が減量されている間は浸透流出量が高いが、表面流出面の深さと面積が拡大すると浸透能の増加傾向は鈍化し、やがて頭打ち状態となる。

地表水に対する停滞は上記のような個体的な抵抗よりも、粗腐植と団粒とが集団的に混在する多孔質のHA層、あるいはA<sub>1</sub>層によって大きく果たされている。これらの層は厚さが1～5cm程度と薄いのであるが、直下のA層に較べると明らかに大きな粗大孔隙率を有し、大きな貯留容量を持つので、これが表層にある場合にはA層に対して漏斗機能を果たす層として被覆分布しているのが特徴である。また、層内に根系や地下茎等を骨格的に分布させているため、侵食に抵抗しうるような安定性を持ち、A層を保護するような形で分布している。降水は、このA<sub>1</sub>層に受け止められた後に土壌の本体層であるA層内に浸透するので、A層の浸透構造に対しては大きな停滞・冠水効果を発揮することになる。HA層あるいはA<sub>1</sub>層が厚く、多孔質の場合、A層の実質浸透能はIbo値の2倍以上に増加することが認められた。

#### 5) 土壌表層における植生構成等の果たしている機能概括

従来は主として前2者の「孔隙の造成と保護」に注目して、植生と土壌の水環境との関係が検討されてきたのであるが、最近になって「草本類の高頻度の更新と、土壌腐植環境下における生物の行動による修復活動」への注目度が高まり、さらに今回はこれに加えて地表にある植物体等が表面薄流に抵抗して生ずる「停滞・冠水による実質浸透能の増加」を考慮することが重要となった。地表での水の動向に関しては地表流出回路と浸透流出回路とが並列回路として用意されているのであるが、ここで、地表流出回路の抵抗を増せば浸透流出量が増すことが、自明の理として理解されるはずである。

このような見地を基本において、植生と土壌の水環境との関係を整理してみる。

## 2 草本植生下（荒廃地）における表層浸透能

土層内に植物の根が伸長・肥大し、この根が枯れると根の跡には若干の腐植を持つ孔隙が残る。次に再び新たな根系が伸長してくれば、一部の孔隙は潰されるが、一部は孔隙として残留する。土壌の表層部は上方空間への持ち上げが容易な環境にあるためか、前年に造成された孔隙の30%程度は空隙として残存する。このような根系の成長と枯死との繰り返しによって、土壌は孔隙率と腐植の含有率とを高めている。草本類は成長と枯死との更新頻度が高いため、このような土壌化（孔隙増と腐植増）とが急速に進行している。浸透能の向上・修復も早い。

土壌が植生の被覆を欠くような条件下に置かれると、雨滴衝撃に曝されることになり、折角、保有していた孔隙構造も破壊されて浸透能を低下させている。さらには、地表流が集中して流速を増すような条件になると溝状の土壌侵食を発生させ、その拡大によって侵食が激化し、貯留容量をも減少させることになる。この場合、地表に近い植生の生育密度の回復が早ければ、地表流に抵抗して侵食を抑制し、生態系の破壊には至らないことが分かっている。荒廃地改善の初期過程は浸透能が低位にあるため、表面流が発生しやすく土壌侵食も発生し易い状況である。土地の水源涵養機能の改善施策としては、根系の更新の繰り返しによる土壌孔隙の造成と共に孔隙を保全し、機能を増幅する高密度の草本植物群の生育面積の拡大を同時に進行させることが重要となる。降水量が多く草本類が繁茂しやすいわが国ではこの意味で荒廃地の出現は少ないのであるが、開発地や不適切な管理地等において草本類の侵入・生息が妨げられるような条件下で裸出状態が長引けば、往々、著しい荒廃が発生している。雨滴衝撃によって浸透構造の形成が妨げられ続ければ、土壌侵食が継続し、腐植を含む全ての膨軟層が流出したような禿山が出現している。西南日本では腐植質のA・B層が失われると粘土質で堅密なC層が裸出するため、植生の侵入が困難となり、荒廃状態からの脱却も困難となっている。

このような雨滴衝撃等による影響とは別に、火山灰の降灰・堆積によって既存の土壌が被覆されても、浸透能の低下が発現している。降灰が広範囲にわたって均等に行われるため、広い面積が全面的に低浸透能となり地表水が発生する。地表水が集中する多くの箇所では侵食・荒廃が進行する。植生ゼロ、浸透構造ゼロの荒廃地が一挙に出現し、火山活動が長期化すると荒廃も長期化する

状況となる。このように極端な状態にあっても火山活動が終息すると、それを契機にして植生の侵入、生育が始まり、土壌孔隙の造成、浸透能の増加も開始されている。堅密な土層箇所が多い禿山に較べて、火山荒廢地の土層は軟質であり保水性も高いからであろう。

火山荒廢地ではこれらの多様な状況変化が広範囲にわたって出現するため、現象の観察、計測が一般の荒廢地よりも容易にしかも的確に行なえる状況となっている。不幸な事象ではあるが、植生と土壌環境との関係が把握しやすい研究場と判断された。多様な状況の経時的変化を把握するための好機と考え、検討を進めてきたのであった。

#### 1) 火山灰裸出土と草本被覆

火山灰は粘土に近い微粒子とシルト、細砂に近いシルト等……厳密には、粒子径を異にする微細粒子が混合した土粒子群である。爆発時の状況と風の状態、噴出源からの距離等によって粗粒なものと同様に分級される傾向があり、火口、火砕流の近接地では粗粒な砂とシルトとの混合粒子としての性格が強い。乾いた風積層として堆積した当初は孔隙性に富む軟質層としての性格を持つのであるが、このような性格を示すのはごく短時間に限られている。高熱下で形成された接着性の強い微粒子を含むためか、一度でも降雨に見舞われると軟質ではあるが粘着性の強いモルタル状の緻密層に変貌し、基本浸透能  $I_{bo}$  が  $0.1 \sim 0.5 \text{ mm/min}$  の低浸透能層として広く地表を被覆することになるからである。火砕流堆積層を覆う火山灰は砂質で、粘土に近い微粒子と細砂・中砂の混合層としての組成を有するのであるが、降雨に見舞われると微粒子としての性格が強くなり現れて細粒火山灰と同様の低浸透能の被覆層を出現している。しかしながら、堆積後2～4年を経過すると強い降雨に見舞われた場合、地表部分の細土が分散されて浸透能に微妙な変化が現れている。この場合、少しでも傾斜があると粘土成分あるいは粘土に近いシルト成分は流出するが、細砂成分は残留するようになる。結果として最表層は細砂質となり、基本浸透能は向上する。逆に、水が停滞するような微凹緩傾斜部では舞い上がっていた粘土、シルトが沈殿して地表を覆うため、基本浸透能は  $0.2 \text{ mm/min}$  以下にも低下する。

このように雨滴衝撃下で変質する砂質火山灰母材であっても、ここにいち早く草本植生が入ると、草冠と落葉被覆によって細土に富む組成が保護されて残

存するので、その後の植物の生育に対しては保水性のある好環境を維持することになる。細土層内では根系群の伸長・肥大―腐朽という更新の繰り返しによって、粒子径よりも大きな孔隙構造が形成されて浸透能は格段の上昇を示すことになる。しかしながら、保護者である草本植生の侵入・生育が遅れると雨滴による細土の分散と流出が継続し、孔隙の造成が進まない状況となる。また、折角、浸透構造ができなかったとしても雨滴衝撃で構造が破壊され、低浸透能の原土状態（下層土）に逆戻りする。なお事例は少ないが、樹木だけが先行して生育した箇所では、小・細根の更新頻度が低いため、孔隙率の増加が遅れ、また、折角孔隙ができても林床が暗く保護者である草本類の生育が充分でないために、浸透能の向上が発現しにくくなっている。具体例として、雲仙ではヤシヤブシの鬱閉林が早く出現した箇所があったのであるが、落葉被覆が十分な緩傾斜の凹斜面以外では健全な浸透構造の発達は見られなかった。緩傾斜の凹地では落葉層の堆積が行なわれるため、時間をかけながらも浸透構造の発達が見られたのであったが、大面積を占める傾斜地では落葉被覆が不完全なため、浸透能の向上が遅れ、その後、ヤシヤブシの枯死に伴う草本の侵入によってようやく浸透能の向上が確実なものとなった。……このような観察経験から、「草本植生の早期侵入による小孔隙造成と土壌孔隙の保護」、これが荒廃地における植生管理上の第一の基本事項となることが理解されたのであった。

環境機能の面から見た直接的な植物要素としては、雨滴を遮断する落葉層・草冠層の被覆が重要である。とくに、急斜面にあっても落葉層を安定堆積させる高密度の草本茎（目釘）と細根（縫い付け）の存在が浮かび上がってくる。これに並行して、その保護下にある表層部で、根系群の更新による孔隙造成が行なわれることが重要である。

植生がない場合でも、膨潤・収縮、凍上、霜上等の土壌気象的な作用によって孔隙の造成がなされている。しかしながら、その後の保護がないため、構造破壊、流失が容易に行なわれて原土状態に戻っている。

以上は、雨滴衝撃による細土の分散と分散された細土を運搬する弱い表面流の条件下での浸透能変化であるが、強い表面流（集中流）が発生するような条件下では細砂以下の成分は殆ど流出して、地表には粗砂～小礫の被覆層が出現している。これらの砂礫は雨滴衝撃では動かないので、場所によっては土壌表層保護の役割を果たすようになるが、その直下層では水流侵食を持続している箇所が多いなど、状況は多様である。細粒の火山灰の含有率が少ない火砕流堆



積層でこのような砂礫優占の環境が出現すると、その後の植物の侵入・生育が困難になる状況が観察される。

## 2) 土石流によって2次移動し堆積した火山灰砂層

雲仙における火砕流の堆積層は、砂礫質である。その砂礫間にある中・小空隙を部分的に火山灰粒子が充填する形で堆積層が形成されている。場所によっては火山灰が優占するが、砂礫が優占する箇所ではなお空隙が多い。このような骨格的な堆積構成とは別に、周辺～隣接箇所に発生した火砕流からの火山灰が4年以上にわたって、多量に供給されて堆積層に加わっている。火山灰の供給は上空から行なわれているため、表層に近い部分が厚い細土質の火山灰層で被覆されているのが堆積当初の状況であった。

このように、1次堆積の火砕流堆積層の表層部は原型として細粒の火山灰層で構成されている確率が高いのであるが、その後の豪雨時に幅広い表面流侵食を受けると2次堆積層を含めて多量の細土が失われ、現在は砂礫質の堆積層が出現している。細粒の火山灰は粒子径が小さく、粒子間の空隙が細小で浸透能が低いので表面流が生じやすく、侵食が発生しやすいのが特色である。しかしながら、一旦草本植物が活着すると侵食が防護され、また団粒構造が作りやすいため安定的な浸透能の向上が早い時期に出現する。そこでは水持ちと空気の流通が良好であるため、その後の植物の成育は旺盛であり、これを受けて根系分布の拡大、小空隙の造成が迅速に進むので水土環境も安定化する。これに対して、緑化が遅れた火砕流堆積面では表面流侵食を受けて、植物の生育に有利な細土層が失われているのが問題である。

1次堆積の火砕流堆積層を構成する砂粒子は粒子間の接着性が小さく、それだけに、植物の根系の伸長、肥大が容易である。しかしながら、土石流によって攪拌されながら再堆積した火山灰砂礫層は砂粒子間の噛み合いが強くなり、しかも粒子間の細小空隙がシルト・粘土で充填され、接着されたような状態になっているので、植物根系が侵入しにくくなり、その結果、生育が困難となっている箇所が出現している。

このような生育環境を受けて、2次堆積した火砕流堆積面では草本植生の生育状況が不良、ないしはやや不良な状態となっており、浸透能の向上も遅れている。この遅れによって表層部での細土の流出率がさらに高くなると、その後の植物の生育、浸透能の向上もさらに遅れ気味となっている。

### 3) 高密度の細根系が分布するマット層

無機質の細土層内に高密度の細根（草本）が分布するような状態になると、根系の伸長、肥大によって周辺の土層が圧密され、一時的には堅密で浸透が困難な状況が出現している。しかしながら、その後の枯死等の繰り返しによって小孔隙率が短期間に増加し、4～5年もすると膨軟化が進行する。前年度に形成された孔隙は、翌年度以降の根系の造孔隙作用によって圧密、破壊される部分が多いのであるが、表層部では上部空間への膨れ上がりが容易なため、20～30%の孔隙が圧密を免れて残存し、膨軟層の厚さを増している（目視調査）。密な草本生育条件下では、このような増孔隙活動が進行し、結果として基本浸透能は向上している。植生の生育・保護条件下で変化する浸透能の実態を確認する目的で、実験による浸透能の測定を試みたのであった。実験に際しては高密度の根系網を保有する自然土層を利用する場合と共に、既存の土砂を洗い出した根系層を利用して供試表層位を作成した。密度条件を異にする供試根系網を調整し、その中に粒径区分を異にする細土の充填を図って実態に近い根系・茎マット状の表層を再現したものである。あわせて土砂の粒度組成は同一であるが、やや粗孔隙率が高くしかもその構造が細根群によって安定となっている層位を調整して実験を行なった。

高密度の根系・地下茎網で構成された根系マット層では、造成された粗孔隙組織が高密度の根系網によって支えられて安定化し、高い浸透能を維持し続ける状況が再現されたのであった。

このような層内構造とは別に高密度の根系マットからは高密度の茎葉が生育し、これらの保護によっても浸透能が安定・維持されていることが認められた。これらの総合機能によって、低浸透能の火山灰土においても基本浸透能が、1～1.5mm/minも向上したのであった。

### 4) 高密度の茎、落葉被覆

地表が高密度の草本類の茎・落葉層等や蘚苔類によって覆われると、雨滴衝撃が遮断され、表層にある浸透構造が保護される。さらなる高密度条件下では、落葉・腐植層が根系によって表土層と結びついて表面流の流下にも抵抗して浸食防止を行い、他方、停滞水による浸透促進にも大きな力を発揮している。

細粒の火山灰土に草本類が定着すると、成育が良好で高密度の根系マットか

ら高密度の茎葉が生育している場合が多い。これらが表土層上にある落葉・腐植層と結びついて、表面流が発生しても強く抵抗している状況を見せている。実験では根系マットと高密茎葉被覆との複合状態を想定して検討を加えたのであるが、植物体（遺体）の被覆条件下では単なる保護作用だけではなく、抵抗（停滞）作用によって基本浸透能自体が向上することが認められた。その結果として、火山灰の草原では実質浸透能が基本浸透能よりも1～2 mm/min 以上も向上しているものと想定された。

既に述べたように、火山活動の終期における火砕流の表層部は全般的に火山灰層が厚く堆積する傾向を呈していたのであるが、この表層部に分布していた火山灰が流されるか、残留するかによって、その後の植物の生育に差異が生じ、土層の浸透能にも大きな差異が生じている。草本植生の生育・繁茂が早かった箇所では、彼らの抵抗によって実質浸透能と保護機能が高まり、成育が遅れた箇所よりも多くの細土が残ったのであった。細土が多ければ植物の根系による浸透構造の造成が進みやすく、これによって有機質土壌としての安定した浸透能の向上が出現し始めたのであった。これに対して、草本の生育が遅れた箇所でも無機的な浸透能の向上が見られたのであるが、土壌としての孔隙造成は低迷している。この間に細土が流されて砂質となったため、無機的な粗孔隙が形成されて浸透能は若干向上する傾向を見せたのであったが、植生による停滞面が少ないため、実質浸透能の向上はなく、また、土壌としての団粒構造の造成も進行していない。なお、阿蘇、桜島では火山灰堆積層が厚く、表層部が流されても砂質層は現れていないので、火山活動が終息した後の植生の生育は比較的に良好である。基層が砂礫質の雲仙の火砕流堆積地とは異なった状況を呈している。

火砕流堆積地では航空実播が施工された流域と非施工流域とがあって、15年を経過した現在でも、草本被覆率、茎密度に大きな差異が生じている。後者の低被覆の流域では終息後も長くガリー侵食を発生していたのであるが、ここで両者の浸透能を調査してみると、意外なことに草本植生の被覆に貧富の差異があっても基本浸透能 Ibo には大差がないことが見出されたのであった。当初の考えとしては、孔隙構造の改善が植生によって進行すれば、その改善度合いの影響によって土石流の沈静化にも差異が生じるものと想定していたのであるが、それでは説明されない結果となっていたのである。先述のように、雨洗作用等によって表土層中にあった細粒成分が流される等の理由によって、植生

の生育が不良な箇所であっても浸透能が若干は向上し、土石流の発生頻度が減少の気配を見せるのではないかと想定していた。しかし現実には、植生繁茂の流域では土石流の発生が減少したにもかかわらず、植生の少ない流域では相変わらず土石流が発生し続けたのであった。浸透能の変化を詳細に見ると、植生の繁茂区では当初、根系の側圧によって孔隙は発達せず、基本浸透能が無植生区よりも劣る傾向が見出されたのであったが、それでも繁茂区では土石流発生の減少が見えたのであった。土壌の基本浸透能  $I_{bo}$  の動向だけでは説明が出来ない状況である。しかしながら、この状況に実験で得られた植生による停滞水の影響を考慮に入れると、植生密度の高い区域では実質浸透能  $I_{bsn}$  が低密度の植生区域よりも格段に高いことが示され、説明が可能になったのであった。実播緑化地では草本密度が非実播区に較べて格段に高いため、実質浸透能も格段に大きくなっており、これによって土石流発生の早期終息が説明可能となったのであった。

火山活動が終息（BP15年）して間もない頃の段階では、植生被覆率が高い箇所であっても、孔隙作用は進んでおらず、それよりも根系間の圧密によって浸透能は低下気味であった。それにもかかわらず、繁茂生育地の流域では土石流の発生が少なく、規模も縮小していたのであった。草本密生地ではその低浸透能をカバーするように、高密茎葉による停滞水効果が発揮され、実質浸透能の向上が果たされていたためと考えられた。

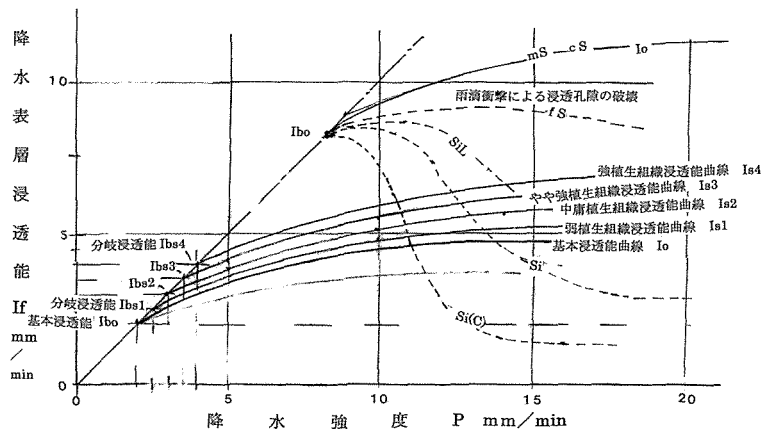
##### 5) 草冠と落葉層の被覆率が高いが下草の茎、根系の抵抗は小

草本の生育密度が低く、根系網の発達はいさいが、落葉の被覆率は100%に近い状況である。被覆層によって雨滴衝撃は遮断されているので基本浸透能以下の降雨であれば問題はないが、それを上回る降雨では表面流が発生するので浸透構造が破壊される危険性が出てくる。落葉層自体の重量圧による接地抵抗はあるが、根系や茎により果たされているような積極的な結びつきはないので、表面流が発生した場合の抵抗が小さく、土壌侵食を伴う浸透構造の破壊が発生しやすくなっている。この条件を再現する目的で、地表を寒冷紗で覆った場合を実験した。観察事項を含めて記述する。意外であったのは、被覆保護だけでも土壌侵食の防止機能が大きかったことであった。被覆のない裸出した条件に較べると格段の差異であった。土壌侵食は雨滴衝撃による分散と表面流の運搬との共同作業で行なわれているので、表面流が発生しても雨滴衝撃がなく

流速が小さい条件下では侵食が発現しないからである。侵食が発生するのは、表面流が局所的にせよ、流量と流速を増して侵食力を持つようになってからのことである。侵食が発生しない条件下では基本浸透能  $I_{bo}$  を上回る降水条件下でも、構造と共に表層構造の凹凸が保護されるので、微小停滞が持続し、実質基本浸透能  $I_{so}$  の若干の向上（2%程度）が期待される状況が出現したのであった。しかしながら、 $I_{so}$  を大きく上回るような強雨下では大部分の面で侵食が発生しなくても、局所的には集中流が発生するため、そこでは衝突力の強い流れとなり、侵食破壊が発生する。一部ではあるが、構造破壊が行なわれるので集水域の浸透能は若干低下する。現実の自然草地では、草本の莖葉・根系が密生することが多いのでこれらの縫い付けによって落葉抵抗が強固となり破壊が防止されている。

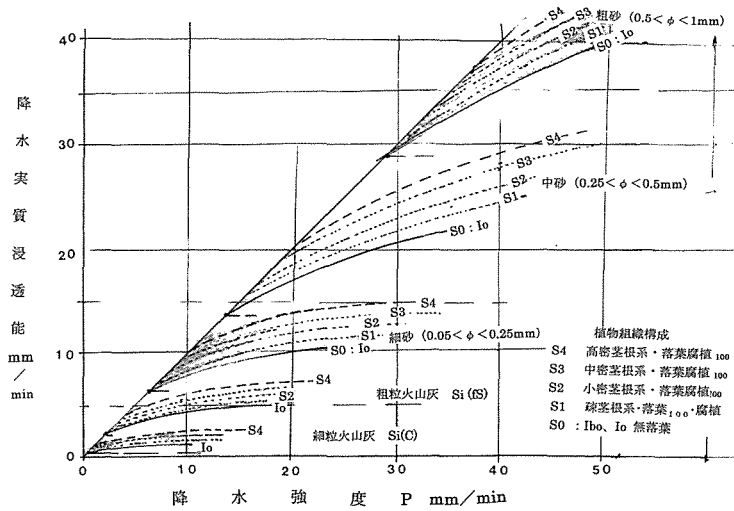
#### 6) 活火山地における火山灰浸透能の実態

細粒火山灰の分布地帯（阿蘇山、桜島）における浸透能の変化を図一3に示す雨滴衝撃による低下曲線（模式概念）と、図一5に示す曲線群形、図一6に示す円筒枠浸透能値と分岐浸透能との関係を利用して検討してみる。これまで



図一3 同一の孔隙土壌において植生構成を変えた場合の降水強度と表層浸透能との関係（前号 p. 57再掲）

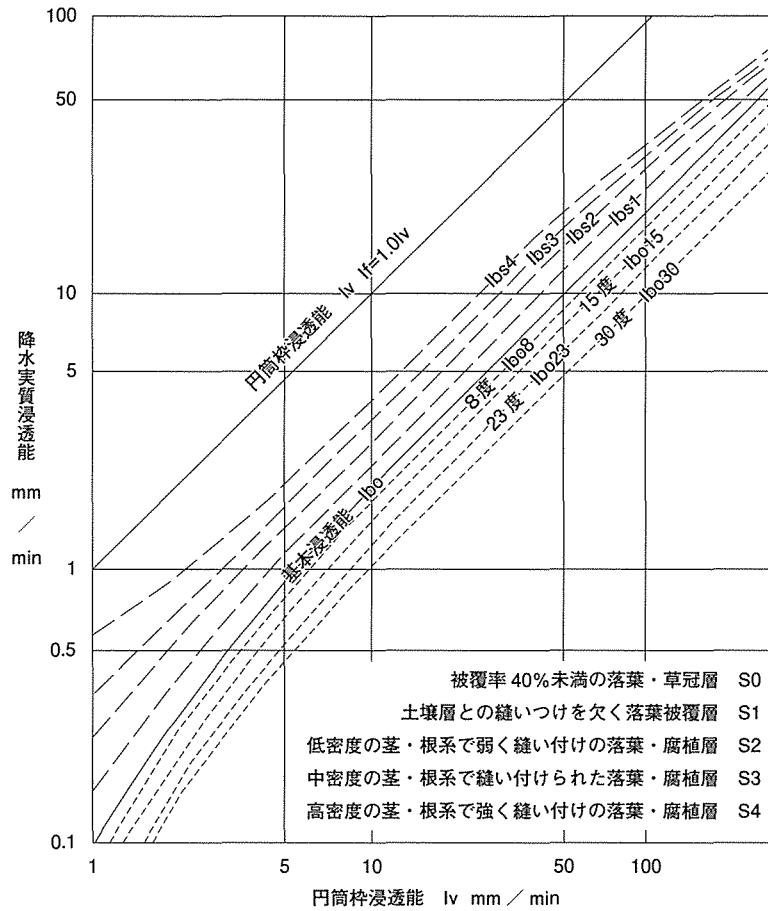
植物の影響が無い条件下での基本浸透能曲線と、異なる植生構成条件下での分岐基本浸透能値と浸透能曲線とを例示する。あわせて、土壌構造が破壊し浸透能が低下した場合を模式想定図として示す。



図一五 粒子径を異にする供試土砂層において構成状況を異にする植生条件下で求めた「降水強度と浸透能との関係」(前号 p. 76再掲)  
 実験で得られた分岐(準基本)浸透能値と分岐後の浸透能曲線(群)を「降水強度—実質浸透能」グラフ上に示す。

実施してきた現地での調査事項と円筒枠浸透能値とを利用して、火山灰降灰後の浸透能の回復経過を経年的変化として定量化を試みたものである。結果は、表一1に示すとおりである。

新生火山灰の堆積流域では表層浸透能が激減するため、表面流が発生するが、これらが集水域内の面上を薄層流として流下している状態では目立った侵食を行なわないが、やがて谷状に連続した凹所に集まると集中流となり顕著な溝状侵食(リル・ガリー)を開始し、さらには土石流を発生させる。この間の事象を整理してみると、まず、面的な広がりを持つ土壤表面に表面流が発生し斜面上を流下するがこの間では侵食は顕著でない。この表面流が幅の狭い斜面の凹部(線状~帯状)に集まると、深さと流量、流速を増して侵食力を発揮し始める。溝状の侵食(リル)を開始し、流下することになる。合流等によって、さらに流量、比重と流速を増すとガリーの発達が顕著となるが、とくに谷状の凹所に入ると侵食の量を増して大ガリーに成長する。ここで侵食溝が浅いリル・ガリー(侵食基準面が浅く緩傾斜)では、先行流の堆積によって後続流



図—6 円筒枠浸透能  $I_v$  と基本浸透能  $I_{bo}$ 、植生分岐（準基本）浸透能  $I_{bsn}$  との関係 傾斜度別の基本浸透能  $I_{boa}$  を付記（前号 p. 77再掲）

の流路が変更させられるなどの現象によって、流路網が安定せず、網目状の広い侵食面を形成する傾向を見せているが、溝の深いガリーでは複数回の強雨があっても侵食は同一流路を走ることが多く、流路の規模を拡大することによって流域内侵食面の拡大を行なう傾向を見せている。ガリーは新たに掘削した侵食土砂量と側壁から崩落するなど既に分散状態にある不安定土砂とを運搬する状態になり、土石流に変貌して下流に押し出している。

表一 火山灰地における植生 (ススキ) の生育状況と浸透能 (mm/min)

区分	細粒火山灰				微砂質火山灰			
	新生 火山灰	3年 火山灰	7年 火山灰	15年 火山灰	新生 火山灰	3年 火山灰	7年 火山灰	15年 火山灰
円筒枠浸透能 Iv	1.0	1.5	2.0	4.0	1.0	1.5	3.0	5.0
基本浸透能 Ibo	0.10	0.2	0.3	0.75	0.12	0.21	0.5	1.0
植生被覆率~40%	(<0.10)	<0.2	(<0.3)	(<0.75)	(<0.12)	<0.21	(<0.5)	(<1.0)
植生被覆率~70%	(0.15)	0.3	0.4	(1.0)	(0.20)	0.28	0.6	(1.2)
植生被覆率~90% Ibs2	(0.25)	(0.4)	0.55	1.2	(0.30)	(0.42)	0.8	1.5
植生被覆率~100% Ibs3	(0.33)	(0.5)	(0.65)	1.4	(0.36)	(0.52)	(1.0)	1.75
植被100%根茎密 Ibs4	—	—	0.8	1.6	—	(0.6)	1.2	2.0
* 傾斜30度の Ibo	0.05	0.1	0.15	0.4	0.06	0.2	0.3	0.5

\* 最下段に、傾斜30度の場合の基本浸透能 Ibo を示す。平坦な場合の0.5倍の値である。傾斜30度の場合、各植生条件下の実質浸透能値も、1/2になる。

傾斜度  $a$  の場合の基本浸透能  $Ibo = (1.0 - \sin a) Ibo$  を想定している。

\* Iv, Ibo の値は、植生の生育・被覆率が経年的に、また規則的に高まることを仮定した場合の数値である。火山荒廃地での変化は植生ゼロ年からの変化であるため、その間に規則性の存在が感じられるのであるが、一般の荒廃地での変化には規則性が認めにくいので目的地の状況に応じて円筒浸透能の測定を行ない、その値と植生構成区分とをグラフ上で対比させて検討することが肝要である。

\* 火山活動が終息して15年を経過しても、植生の被覆率が0~40%の低位に留まっているような箇所が分布している。そこでは、表層土壌の構造造成に対する植物の影響は小さく、増構造変化は専ら土層環境の無機的な造孔作用だけに頼ることになる。そのため、出発時点からの Iv, Ibo の値の変化は目だつた上昇を示さず、表一1の数値の30%以下に止まっている。但し、雲仙火砕流のような砂質火山灰の場合には、雨滴衝撃等の淘汰を受けて表層の粒度組成が砂質の度を高めているため、表一1(右)に近い経年変化を示している。

\* 土壌硬度が堅密な土層(山中式硬度指数値>27mm)では、植生根の侵入(伸長・肥大)が困難なため表一1に示すような短年時では浸透能の改善は見られない。土壌の造孔隙運動が生物活動に依存する以上、活動場の土層の堅密度に強く影響されることを物語っている。

リル・ガリーが侵食力を持つためには、一定値以上の流量・流速を持つことが必要となるが、具体的な要因として表面比流量と集水面積、流路勾配(滝の有無)が規定されることが必要である。ここで現実の荒廃地を調査・観察してみると、土壌素材と傾斜とが近似すれば斜面で発生しているリル密度、ガリー密度は一定値に近い様相を呈していることが見出される。リル・ガリーの発生に必要な単位集水域の面積が浸透能に応じて、大略、一定値になるからと説明される。集水面積を一定値扱いにすると、リル侵食に必要な水量は主として表面比流量によって規定されることになる。この量を経験的に20~30分の降雨時間の中で、6~10mm以上の表面流出を生じた場合と考えた。



具体的には、対象流域の実質浸透能（表—1）によって実質表面流出比流量を求め、その数値に土石流発生に必要な表面比流出量を加えると危険雨量を推定することができることになる。従来、桜島等で用いられている経験則を読み替えてみると、実質浸透能値  $I_f$  を上回る降水強度  $P$  が連続的に計測された場合に、 $(P - I_f)$  の積算量が  $6 \sim 10\text{mm}/20\text{min}$  あるいは  $6 \sim 10\text{mm}/30\text{min}$  以上になった場合に、土石流が発生すると想定することが基本である。（厳密な検討ではないが、思考例として提示する。）例に取ったのは火山灰であるが、ほかの荒廃地にも適用できるはずである。但し、堅密な赤色土層（裸出した段丘面）などでは流水による土粒子の分散が困難であるため、異なった状況が出ている。

#### 7) 森林化の必要性

火山灰土壌層の浸透条件は、草地環境下で急速に向上し草地化開始後10年もすると一応の安全域には到達するのであるが、仔細に検討するとなお未完成の構成が多く、不安定な条件下にあることが見出される。土壌孔隙構造に頼る基本浸透能だけでは自然の降雨強度に不足するので、それを補うために草本植生の高い密度によって構造の破壊を防止しながら、さらに水停滞による浸透能増によって辛うじて実質浸透能を高めている状況である。基本浸透能のさらなる向上が見えないと環境の安定化に向っていないと判断されることになる。この環境条件をより完成度の高い機能域にまで到達させるためには、浅根性、細根性で化学組成が偏った草本類（ススキなど）では改善能力に限界があると考えられ、これに替わって更新期間が長く、遅効性ではあるが深根性で根径が大きく、化学的組成が豊かな森林の助けを必要とすることになる。具体的には、土壌表層部での大きな団粒構造の形成、土壌層の深部（中・下層部）における粗孔隙の形成が目標となる。小型の草本類だけの活動ではこのような大孔隙層の形成、深い土層部分の粗孔隙層の形成と改良が困難であるからである。

表層部での孔隙径が細小で基本浸透能が小さい草地土壌では、基本浸透能の能力不足を高密度の茎葉で表面流を停滞させることによって補い、実質浸透能を高めている。更なる強雨によって表面流が発生しても、高密度の植物体の分布によって土壌侵食の発生に抵抗し、同時に浸透能を高めて侵食力の発現を抑えている。これに対して、長い歴史を持つ森林下では大孔隙組織の形成が充分に行なわれているので、表面流の発生確率が小さく、直接的に侵食に抵抗する

必要性がないのが普通である。表面流が発生した場合に備えての抵抗増の構成を強化することよりも、表面流の発生を許さないように現存の浸透構造を保護すること、具体的には雨滴の衝撃を遮断することの方が重要となっている。この程度の役割であれば軽小な落葉層であっても、これらの被覆率を100%近くに維持することによって充分に対応することができるはずである。落葉層の均等被覆を支えるような少数の草本・低灌木の分布さえあれば、彼らの支持作用によって浸透機能を維持し続けることが可能となっている。林床にある低小密度の草本類の茎の目釘作用と表層に分布する細根による縫い付け作用に期待するものである。

原始土層での浸透構造の造成・維持のためには高密度の草本群の生育が必須条件であるが、これによって、一応、最低限の浸透環境にまで到達することが出来れば、そろそろ、森林造成に移行すべき段階に達したものと判断される。

#### 参考文献

- 村井宏, 岩崎勇作 林地の水および土壌保全機能に関する研究 II 林業試験場研究報告286 1976
- 竹下敬司, 高木潤二 暖帯林地の水保全環境に関する土壌及び地形的研究 福岡県林業試験場時報26 1977
- 竹下敬司 水資源涵養機能と森林土壌の構成 I 水利科学 No. 276 48巻1号 2004
- 竹下敬司 水資源涵養機能と森林土壌の構成 II 水利科学 No. 277 48巻2号 2004
- 竹下敬司 林地が果たしている河川流量調節機能とダムの調節機能との関係 福岡県水源の森基本調査報告17 1995
- 竹下敬司 森林土壌表層浸透能の物理的構成とそれに対応する植物構成 118回森林学会講演 2007
- 竹下敬司 土壌表層浸透能の物理的モデル化 119回森林学会講演 2008

(九州大学名誉教授)

(原稿受付2010年6月23日, 原稿受理2010年8月18日)