

木と
森と

サイエンス

水の

中野秀章
有光一登 著
森川 靖

社団法人
日本林業技術協会

森と水のサイエンス

中野秀章

有光一登

森川 靖

著

はじめに

宇宙から送られてきた、青く輝く地球の映像を初めて見たときの感動はいまだに忘れることができない。われわれの地球が、荒りようとした不毛の表面を見せる他の天体と違って、いかにも生物がすむにふさわしい穏やかな相ぼうをもつ、まさに水の惑星であることを目のあたりに示してくれたからだ。

地球を地球たらしめているもの、それは水であるといっても過言ではないだろう。水なしには、生命は生まれ得なかつたし、今日の地球の生態系を形づくることもなかつたであろう。

生物がどれほど水が必要とするものか、人間の生存に限ってもそれはぼう大な量になるだろう。人体の六五％は水である。そして一人一日に約二・五リットルの水が必要とする。五〇億人が生きるためには毎日一二五万立方メートルの水を消費していることになる。また、農作物を生産し、さまざまな物資やエネルギーをつくり、生活環境を浄化するなど文明社会を維持するための活動にもぼう大な量の水が必要なことはいうまでもなく、社会の発展に伴って水の利用は、今後も増加を続けると考えられる。

地球の水の量は、その創生期以来変わらないといわれている。一定の量が絶えず循環をくり返しているので人間は常に水を得ることができるのであるが、必要な量がどこでも得られるわけではなく、地域による降水量や降水を受けとめる地表の状態によって利用可能な量に大きな差が生じる。

わが国は、世界でも有数の降水量に恵まれているため樹木の生育に適し、国土の七割近くを占める山地は幸いなことにほとんど樹木に覆われ、緑したたる森林となっている。森林があることよって降雨は一挙に海に流出することなく、常に豊かな河川の流れを現出させている。従来、わが国土が、山紫水明、豊葦原瑞穂の国などと言い表されてきたほど水には恵まれていたのも、そのためである。

森林の雨水流出平準化という働きは水を確保し、洪水を防止するなど人々の豊かで安全な暮らしを支えるうえでやはり知れないほど大きな意味をもっている。

読者が本書によって、森林の水資源かん養にかかわる働きにいつそその関心を深め、健全な森林の育成・管理がいかに重要であるかを理解くだされば幸いである。

森と水のサイエンス

目次

1 減りもせず増えもしない地球の水

どこにどれだけの水があるか 11

たえず循環する水 13

2 限りある貴重な資源

すべての生命に不可欠な水 17

限りある水資源 18

地域と季節で異なる水の量 21

水の循環と森林 28

3 森林に降る雨の行方

森林に降り注ぐ雨 31

林冠などによる降水の遮断 35

浸透と流出 40

森林植生による蒸散 42

川の流れを調整する森林 43

4 土の中の水の動き

森の土は水を吸い込む——土壤の種類と保水力 47

地被や土壤による浸透能（水の吸い込み方）の違い 48

土壤の保水力 57

土壤のすき間と水の流れ 60

森林の土は水をきれいにする 63

5 樹木の生育と水

生命の井戸水 71

植物の水吸収と土壤の水 73

植物の水経済 75

湿度を考える——湿度六〇％は乾いている 76

蒸散量はどう測るのか 79

蒸散——一日に三〇トン 83

蒸散量の多い月は、年間の蒸散量は 85

間伐や枝打ちによって蒸散量は減るか 88

蒸発と蒸散は本当に同じか 90

水の吸収と移動——一〇〇メートルも昇る 91

水移動の経路——壁の中、管の中を水は流れる 96

水と成長 101

6 森林の水保全上の役割

森林の水保全機能とは 103

水の流れをならす森林の土 109

森林の状態と水の流れ 116

うまい水もつくる森林の土 121

森林による水の消費 122

7 水保全機能の高い森林

単純より混交、若齢より高齢がものをいう

126

混交社会の構成要員

133

8 降水による災害と森林

洪水害

137

山崩れ

142

土石流

148

地すべり

150

なだれ

153

9 むすび

157

用語解説

森と水のサイエンス

I 減りもせず増えもしない地球の水

どこにどれだけの水があるか

太陽系の九つの惑星のうち、水の惑星とよばれる地球の水が、その進化の過程で、いつ、どのように生じたかは、いまだにはつきりわかっていない。しかしとにかく水は、海洋・湖沼・河川・土壌・基岩や動植物の体の中などに塩水または淡水として、また、南・北両極や高山などの地表に氷雪として、さらに、大気中に水蒸気として存在する。つまり水は、液体・固体・気体の三態のいずれかの形で存在する。

これらの形態で存在する水の量については、多くの算定の試みがある。算定の基礎がそれぞれ多少異なるため、学者によっていくらかの差異はあるものの大差はない。水の総量は一三億ないし一四億立方キロメートル前後、算定の代表例によると一三・八億立方キロメートルとされている。水は地球の表層五キロメートルの範囲内に存在する最多量の物質であり、第二位の長石の六倍以上と

推定されている。これは平均水深二七〇〇メートルで地球の表面すべてを覆うことのできる量である。このことから地球が水の惑星とよばれるのである。

存在形態別の比率は、地球の表面積五・二億平方キロメートルの約七〇%を占める海洋の塩水が約九七・五%とほとんどを占め、残りのわずかに二・五%程度が、主として陸地の淡水である。淡水のうち一・七五%は氷雪で、地中の水は〇・七三%、湖沼・河川の水は〇・〇一%、生物体内の水は〇・〇〇〇一%程度である。大気中の水蒸気は〇・〇〇一%程度にすぎないといわれている。

これらの水については、宇宙空間への水蒸気の放散、電気分解などによる消失、植物の光合成による固定化などに帰因する減少と、地球内部のマグマからの処女水の出現、化石燃料の燃焼、生物の物質代謝過程での生化学的作用による合成などに帰因する増加が考えられる。しかしその総量は、われわれ人間が問題とする程度の長さの時間内では、減りもせず増えもせず一定不変と考えてよいとされている。

たえず循環する水

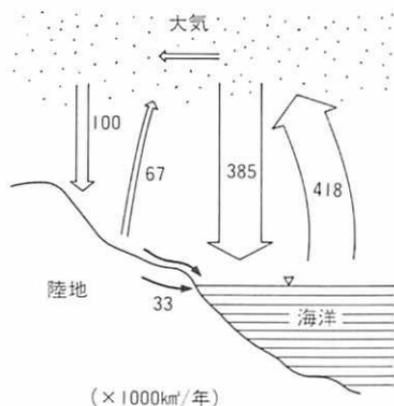


図1-1 地球の水循環(山本莊毅 1987)

地球の水の存在形態は液体・固体・気体の三態に区分されるが、さらに地球のいわゆる三圏(水圏・地圏・気圏)と、それらの細部にわたる所在場所によって違い、その存在形態はきわめて多様である。しかも、それぞれの形態でそれぞれの場所に独立して存在するものではなく、相互に密接に関連しながら、たえず相互転換しているのである。すなわち、海水も陸水も太陽エネルギーで暖められて、その一部が、場所によって経過は異なるが、気化して水蒸気となり、大気中に広がって滞留する。ついで、凝結して雲をつくり、やがて、雨や雪などになって再び、海洋・陸地にもどり、三圏にわたる循環を繰り返している。

年間の循環水量を算定した例が図1-1である。海洋からの年間蒸発量は海水量の○・○○○三%に当たる四一万八○○○立方キロメートルあり、陸地からのそれ

は陸水量の〇・一九％に当たる六万七〇〇〇立方キロメートルである。そのうち、海洋に降水として直接もどる水の量は海水蒸発量の九二％であり、陸地の降水量は陸水蒸発量より多く、その一・五倍に相当し、その三三％が河川などを経て海洋にもどっている。

海の水が大幅に増減しないことからわかるように、地球全体の一年間の総蒸発量と総降水量、すなわち、気体化と液体化の量的バランスは保たれている。海洋から蒸発した水の多くは海洋にもどるが、一部は気団によって陸地に運ばれ雨や雪となる。このような循環経路の変化は陸地でも起こっており、ある地域で蒸発した水が風によって別の地域で雨や雪を降らせている。循環経路は、年により季節により変動する。その変動状態は海と陸の位置関係や地形などによって大きく異なっている。いずれにせよ、循環の経過は細かくみればきわめて複雑である。この循環によって人類を初めとする生物の生存分布が大局的に支配されることになる。

ある地域で水蒸気となった水が、その地域の上空で液体となり雨や雪としてもどってくる確率は、広大な地域を考えれば大きい、小さな森林地域や湖沼のような範囲で考えるときわめて小さい。砂漠に人工湖やかんがい農地をつくれば、その砂漠の降水量が飛躍的に増大するかもしれないと今日でも考えられている。たしかに、ナイル河のアスワンハイダムの広大な水面によってエジプトの砂漠地帯の雲量が変わったりする気候への影響についてはよく知られている。つまり、細かい水循

環への期待である。しかし、大陸諸国における気象学的研究によれば、大陸内各地域の降水の源としては、それぞれの外部から大気の流れで運ばれてきた水蒸気が七割以上の圧制的割合を占めるとされている。一方ではまた、アマゾンの大樹海地帯に降る雨のおよそ半分は、その森林からの蒸発と蒸散による水蒸気を源としているという研究結果もある。この研究では、雨水を構成する酸素の同位体である酸素一八（質量数一八）の存在比率を推定の根拠にしている。水を構成する酸素には質量数が二のジューテリウム（重水素）と質量数が三のトリチウム（三重水素）の二種類の同位体がある。これらの存在比率、とくに安定同位体とされている酸素一八とジューテリウムの存在比率は、気象学的方法では不可能な水循環の細かい追跡・判断の材料になるものと考えられ、今後の研究の発展が期待されている。

地表に達した降水の一部は蒸発して大気中にもどり、一部は地表を流れて河川に流入し、他は重力で土のいろなすき間にしみ込む。地中にしみ込んだ水の一部は毛管引力で再び地表にのぼって蒸発したり、植物に吸収されて蒸散したりして大気中にもどるが、他はさらに深くしみ込んで基岩などのすき間の地下水となる。地中にしみ込んだ水の一部は超長期間を経て直接海に浸出するが、多くはゆっくり流動して河川に流入し、やがて海にもどる。河川に流入した水の一部は水面から蒸発したり地中水にもどったりする。このように、水の循環の地圏における細部の経路はきわめて複

雑である。このことによつて、また、人間を初めとする生物の生活活動が著しく左右されることとなる。

いずれにせよ地球の水はほとんどすべてが初めも終わりもなく、常時、複雑に循環するという性質をもっている。循環にかかわりのない処女水などというものは量的にきわめてわずかであり、確認さえむずかしいとされている。

2 限りある貴重な資源

すべての生命に不可欠な水

原始の海洋は今から三五億年の昔に生じ、少なくとも二〇億年前には現在とほぼ同じ量の塩水が存在していて、そこに、初めて生命が生まれたとされている。塩水は、生物にとって生きるに不可欠の物質であった。その後、生物は種類と数を膨大に増していき、その中から、四億年ほど前の古生代中期に陸地に進出するものが生じたと推測されている。わが国でも三億八〇〇〇万年前の古生代・デボン紀中期に、近くの陸地から流れてきて化石化したと推定されるシュードスポロクヌスとよばれるシダ類の仲間の化石が岩手県大船渡市内で発見されている。それらは淡水に依存するようになり、それ以来、水（水素二原子、酸素一原子から成る単純な化合物で、純粋なものは無色・無味・無臭）は、すべての陸上生物にとって、空気とともに不可欠の物質となった。こうして、地圏において水は、土や空気とともに生態系の形成と秩序を支配する主な媒体となった。多様な循環過

程をもつ水は、まさに多様な自然環境の根幹的要素となったのである。人類は自然環境の中で水を飲用して生き、水を利用して食糧を生産するとともに、生活のための諸物質をつくり、生活の豊かさを確保した。ときには洪水などの厳しい循環過程に支配されながらも、一方では美しい水環境に親しんで心身の健康を保ち繁栄してきた。

水はわれわれの生活、生産活動を支える代替物質のない貴重な資源である。水とのかかわり方の内容は時代とともに変化してきたが、古来多くの文化・文明がたどった経過からも明らかのように、水は人間社会の栄枯盛衰を支配してきた。水は現代でも決定的な使用資源であり、環境資源であることに変わりはない。

限りある水資源

資源として利用される水は、地球全体の水の総量からすればきわめてわずかな陸地の淡水である。その淡水の大部分は氷であり、水質と所在場所の面で、海水と同様に利用上大きな制約を受けてい

る。しかし、利用できる淡水はわずかであるものの、それは常に循環しているから取りつくしてしまふということはない。使用資源としての水は、ある時点に循環経路のどこかに滞留する量よりも、循環の経路と速度が重要である。同様のことは環境資源としての水にもいえる。この点では陸水中に占める割合の非常に大きい地中水も、氷と同様循環速度はきわめて遅く、利用できる量は少ない。また、水は循環過程で、ある地域内に降水や河川水、あるいは地下水となって入る一方、河川水・地下水の流出や蒸発、あるいは植物の蒸散などによって他の地域へ出ていく。入る量と出る量の差が、その地域の水保有量となる。これらの量の間にはある均衡が成り立っており、これを水収支というが、その内容、とくに時間的配分が重要である。

さて、地圏における循環の細部過程にある水の第一の存在形態は、降水である。世界の陸地の平均年降水量は九七〇ミリメートル程度とされているが、その地域分布はきわめて複雑で、地域差が大きい。大局的にみると降水量は、気温の高低による大気中の水蒸気の多少から、低緯度地帯で多く、高緯度地帯になるにつれて少なくなる。また、海洋に接する大陸の東海岸地帯は西海岸地帯より多く、海洋に遠い大陸の内部ほど少なくなる傾向がある。しかし、これらも固定的なものではない。理由は必ずしも明確ではないが、事実として、長期的に気候帯の広がりの変動がみられたりして、水循環の経路に超広域的な変動の起こることもある。これらの点で大局的に降水をとらえるこ

とは容易ではない。

わが国はユーラシア大陸東海岸に位置し、世界有数の多雨地帯であるアジアモンスーン地帯に属している。最近三〇年間の全国約一三〇〇地点の平均年降水量は約一七五〇ミリメートルで、世界のその二倍弱に相当する豊かさである。一方、わが国における最近の全国水使用量は、生活用水・工業用水・農業用水を合わせて約九八〇億立方メートルで、この数字にみる限りでは、過少雨年でもまだ余裕があることになる。これは、水資源賦存量よご（全国の平均年降水量に国土の面積を乗じて水量に換算した約六六〇〇億立方メートルから、蒸発や植物の蒸散による消失量を差し引いた量）が約四三〇〇億立方メートルであり、近年、一〇年に一年の割で出現している過少雨年の水資源賦存量が約三〇〇〇億立方メートルとされているからである。さらに、二十一世紀に人口増加と社会の一段の発展があっても、使用水量は一〇〇〇ないし一四〇〇億立方メートル程度までの増加と推測されているので、数字のうえではまだ余裕があることとなる。そうだとすると、水資源量の確保には問題がないかのように思えるが、実は、問題は多いのである。

地域と季節で異なる水の量

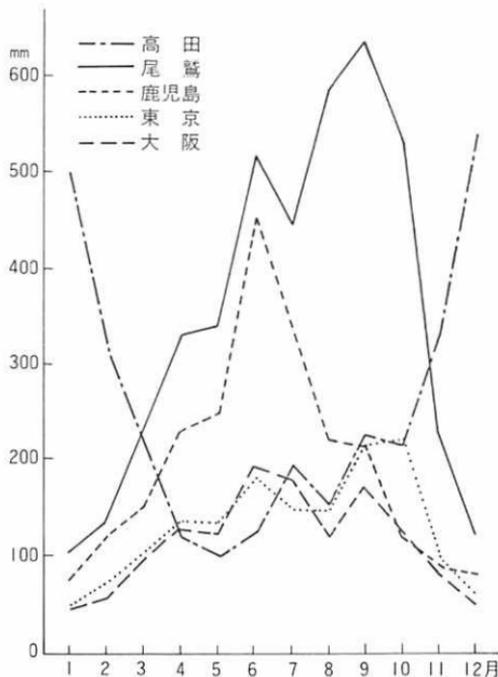


図2-1 日本の各都市の月降水量(高橋 裕 1963)

問題は、全国をひとまとめにして考えた降水量と水資源賦存量の年間総量にとどまることではなく、これらが、本来、地域的・時間的に偏りが非常に著しいことにある。すなわち、降水がほとんどの地方では梅雨期・台風期に、日本海沿海地方では冬季にまとまって降ることが多く、これらの中間期には少ないことである。その例を図2-1にみるができる。このような降水の傾向が、当然、河川の流量の时期的偏りを著しくしていることが図2-2に示されている。そのため、降水期には水害発生、中間期には水不足発生のおそれがある。一方、

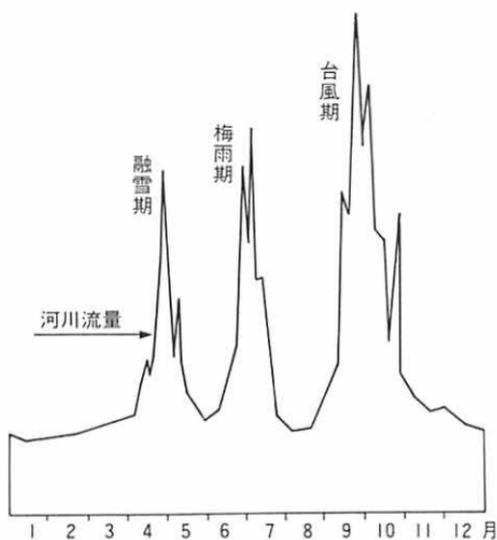


図2-2 わが国の河川流量の季節変動

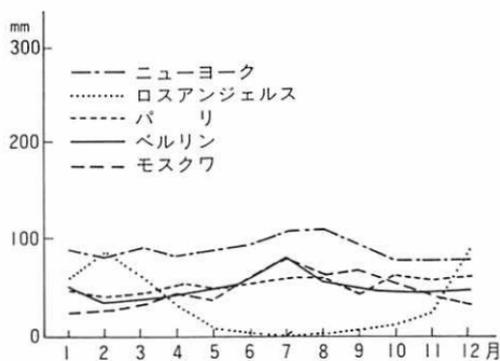


図2-3 世界各都市の月降水量(高橋 裕 1963)

台風期に台風の来襲がなかったり、梅雨期がからつゆになつたりすると、水害のおそれはなくなくなるが、水不足は厳しいものとなる。このようなわが国の降水の特徴は、偏りのほとんどない図2-3の事例と比較するといつそう明らかになる。降水量の偏りの少ない地方では、河川流量の年間にわたる一様性が高いため、水害のおそれは少なく、水利用が便利であることが多い。

また、日本は世界的な多雨国ではあるが、地域別にみれば多雨、少雨の地域差はかなりあるので、

地域区分	人口 (千人) (昭和60年)	渇水年			平水年		
		降水量 (mm/年)	水資源 賦存量 (億m ³ /年)	人口当り の資源 賦存量 (m ³ ・年 人)	降水量 (mm/年)	水資源 賦存量 (億m ³ /年)	人口当り の資源 賦存量 (m ³ ・年 人)
北海道	5,679	955	402	7,079	1,185	595	10,477
東北	12,209	1,370	644	5,275	1,669	882	7,224
関東	37,619	1,227	252	670	1,530	364	968
東海	15,943	1,763	532	3,337	2,151	698	4,378
北陸	3,088	2,132	178	5,764	2,612	238	7,707
近畿	20,081	1,480	223	1,111	1,876	331	1,648
中国	1,411	1,557	90	6,378	1,978	133	9,426
山陰	6,338	1,351	150	2,367	1,710	228	3,597
山陽	4,227	1,688	181	4,282	2,145	266	6,293
四国	8,444	1,499	116	1,374	1,938	195	2,309
九州	4,833	1,854	254	5,256	2,425	393	8,132
北九州	1,179	1,495	12	1,018	2,135	26	2,205
南九州							
沖縄							
全 国	121,049	1,401	3,034	2,506	1,749	4,349	3,593

表2-1 地域別降水量および水資源賦存量(日本の水資源 国土庁 1988)

少雨の水源地域が水需要の大きい都市域と水需給で結びつくと、その用水量確保は決して容易でなくなる。このことは、表2-1にみられるように、大きな地域別でも人口一人当りの水資源賦存量の比較によって明らかに認められる。ここで、水資源賦存量とは、前述のように、降水量から蒸発と植物の蒸散によって消失される量を差し引いた量に、その地域の面積を乗じて求めた量である。また、渇水年とはおおむね一年に一年発生すると予測される年降水量の異常に少ない年である。なお、このような事実は、さらに小さい地域間でも考えられる。

しかも、高い山のある急峻な地形の島国では、図2-4にみられるとおり、河川は急勾配で短い。そのため、降水は短時間に一挙に流出しや

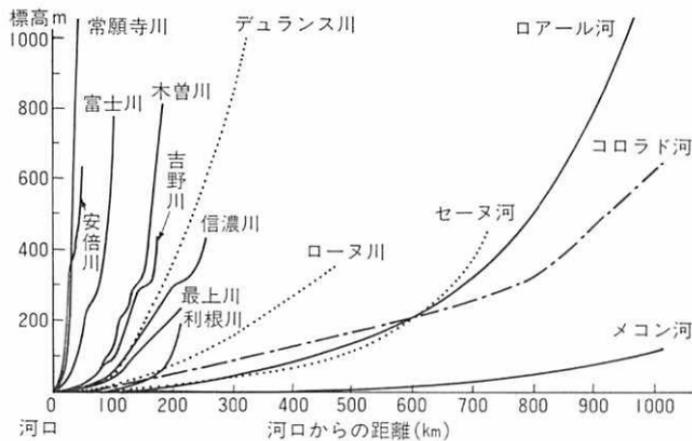


図2-4 河川の縦断曲線(高橋 裕 1976)

すく、洪水のおそれが強い一方で、無降雨時には渇水になるおそれがある。

わが国は全国平均の年降水量では世界的な多雨国でありながら、水資源として使用可能な水量には、いずれの地域でも、降水量の季節的な制約、河川流量の時間的な制約があり、少雨地帯ではこれらの制約がとくに厳しい。しかも、これらの事情は、反面で、洪水害のおそれの強いことを裏書きしている。

さらに近年、わが国の降水事情で見過ごせないことは、図2-5に示すとおり、一九〇〇年以降、年間変動の大きいなかで、平均傾向では年一ミリメートル強の割合で年降水量が減少していることである。とくに、一九五五年ごろ以降は減少の傾向がはっきりとしており、少雨期に入ったともいえる状態にある。しかも、一〇年に一年、ごく最近では四年に一年の割合で一五〇〇ミリメートルを下回る、あるいは、一三〇〇ミリメートルほどの、かつ

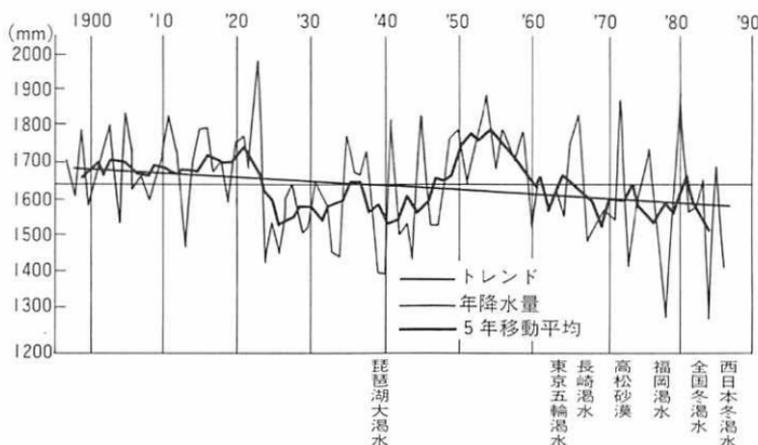


図2-5 日本の年降水量の経年変化(全国総合水資源計画 国土庁 1988)

てなかった少雨の年が出現している。これらの少雨の年には、各地で深刻な水不足問題が発生していることはよく知られている。このような年には、蒸発や蒸散による消失量は四〇%以上にもなるので、河川の流出量は全国の年間総量で約三〇〇億立方メートル以下、平年値の半分以下にもなりかねない。このようなことも水資源の将来に楽観を許さない事実である。

近年の世界的気候変動の理由はいまだ明確にはされていないが、太陽活動の変化や海水温の変化、または火山噴火などの自然的要因が挙げられる。一方、大気中の二酸化炭素の増加をもたらし化石燃料の消費拡大と都市化の進展、あるいは森林破壊なども話題となっている。今後の気候変動が予測されるとき、その余波としてみると、この降水傾向の長期化が懸念され、いずれにせよわが国の水資源の将来は決して楽観を許さ

れないといえる。

ところで、前述のとおり、水資源賦存量の全国総量は普通年で約四三〇〇億立方メートル、渇水年で約三〇〇億立方メートルとされているが、この水量のすべてが利用の対象となっているわけではない。例えば、沿海の低平地帯の水は必ずしも利用されておらず、利用対象の主体は、国土面積のおよそ七割程度を占める水源山地帯からの河川の水である。したがって、実際に利用可能な量は、面積割合からすれば七割程度といえよう。したがって、近年における全国の年間水使用量約八九〇億立方メートルは、普通年で利用対象となる水資源賦存量の三〇％程度、渇水年で四五％程度に相当することになる。しかも、賦存量には地域差があり、使用量も地域差が大きい。地域別に両者の関係を見ると、使用量が多くて賦存量の比較的少ない関東・近畿地方では渇水年で五四％程度、北九州地域では四〇％程度の使用率に達していると考えられる。しかし、年間総量でみると数字のうちでは、まだ、水資源の確保に窮する状態ではないといえる。

ところが近年、毎年のように大なり小なりの渇水問題が全国のどこかで発生している。その理由は結局、水資源賦存量の地域による年間変動の著しさにあるが、直接的には、季節的・時間的な河川流量の偏りの著しさにある。言い換えれば、年間を通じて安定して河川を流れる水量は賦存量の三分の一程度と推定され、三分の二以上は変動の激しい不安定な流量で、利用は容易でないという

ことである。いわば多くの水が無駄に海に流出していて、しかも、一部が洪水害をもたらすおそれ
が強いということである。これに対して水使用量は、都市用水では季節・曜日などによる平均日使
用量の増減が二〇％程度で、循環過程の河川流量、地中移動水量の変動に比べれば、ほとんど一定
量ともいえる。しかし、農業用水では季節的・時間的変動が大きく、水資源使用量は、変動の少な
い河川の低水時流量の大小によって規制される。

このことから、わが国の水問題の根底的原因は河川流量の季節的・時間的偏りの著しさであると
いえ、この偏りを少しでも緩和させることが必要なわけである。

このため、ダムを設けて、流量を人工的に調節して偏りを改善することが有力な手段として行わ
れる。しかし、流量の偏りを改善するのに有力なこの手段も、自然の循環過程を人為的に規制する
ものであるために無理があり、副作用的な付帯現象などによる多くの問題も見逃せない。

いずれにせよ、人と水とのかかわりは、自然の循環過程、大きく気圏から地圏への過程や地圏に
おける細粗多様な過程とのかかわりである。生活・生産活動のために自然の過程にいかに対応して
いけるか、ときには、その変更をいかに無理なく行うかが課題となる。

まだ陸地に植物が出現しなかった水惑星の原始時代にも、水圏・気圏・地圏の間に水の循環は存在したはずである。すなわち、海洋を主とする水圏から蒸発した水蒸気が大気中に広がり、やがて雨や雪となって降下して水圏にもどり、また、地圏に達した降水はその地表を流れ、あるいは地中に浸透して移動し、水圏にもどっていった。もちろん、一部は地圏から直接気圏にもどったであろう。それらの巨視的な自然現象は、昔も今も変わりはないであろう。

現今、水源地の主体を成す山地は、その後の超長期間における火山活動による噴出物の堆積層、造山運動による破碎層、氷河、洪水に運ばれて堆積した砂礫層などから成る。さらに、その表層はやはり超長期間にわたって機械的・化学的風化作用を受け、大小多様な間隙に富む表層地層を形成するようになったのである。

それ以来、地表に達した降水の多くは、地中に浸透してゆっくり移動し、一時的貯留後徐々に、あるいは非常に長期の滞留後放流された。そして結果的に、時間的変動の激しい降水が時間的に調節された形で、相対的に穏やかに流出することとなった。このことは、前述のように地中水の存在

比率が意外に高いことから裏書きされており、地圏における循環経路で地中の占める割合が高くなっていったのである。

さて、植物が生育するようになり、やがて、広大な地表を被覆し、風化表層に網のように根を張り、有機物を不断に供給して風化物層の物理的・化学的性質に変化と安定化をもたらした。そして、それは、降水の地表への到達のしかた、地表での流れや浸透、地中での透水などの現象を通じて、地圏における水の循環と質にさまざまな形で間接的にかかわることとなった。また植物は、生育するため、たえず地中の水を吸収し貯留・蒸散することによって、地圏から気圏への水の動きに直接かかわることにもなった。この場合、水は植物体内を経由することとなり、文字どおり、植物は水の循環経路の一つとなったのである。このように植物社会は、水循環の細部にかかわることによって、旺盛な発展をとげてきたのである。

規模的に植物社会の代表的存在である森林は、地圏における水の循環過程で、降水が地表や地中を経由して河川に流入する状態に関与した。その結果、地圏における水の循環速度、つまり河川の流れの時間的変動を調節する山体の本来の機能を助長することとなった。このことが、人間の日常生活に欠かせない水の循環過程にかかわる森林の働きといえる。

また森林は、地圏から気圏への循環過程で、存在地域の上空大気中の水蒸気の多少に関与する。

これが当該地域の降水の多少に影響するとしたら、このことは直接的に、あるいは河川流量のあり方を通じて、人の日常生活にかかわることとなる。そのかわりは局地的には薄い、広大な地域を対象として考えれば、循環過程における森林の立場は有意なものとなろう。例えば、海洋から遠い大陸内部の、しかも広大な砂漠地帯の周辺における森林の存在は、かなりの意味をもつものと推測されている。

地圏における水の循環過程のあり方は、人間社会にさまざまな影響を及ぼしてそのあり方を支配する。したがって、水の循環過程を定性・定量的に明らかにすることは、人間社会の維持・発展にとって不可欠の課題である。その水の循環過程に広大な地域でかわる森林の立場を明らかにすることは、無類の重要性をもっているといえよう。

3 森林に降る雨の行方

森林に降り注ぐ雨

人間は地球の陸地の五分の一を占める森林地帯とその周辺で、森林の多様な効用に依存して生きてきたし、今でも依存して生きている。人間にとって生存に不可欠な物質である水の森林地帯での多様な循環のあり方は、生活に、ときとして決定的ともいえるほどの影響を与える。

森林地帯における水の循環は、気圏からの降水や霧の到達によって始まる。森林に到達した降水と林内で雨滴化した霧の一部は、地表・林冠などの表面で再び気化して、大気中にもどっていく。しかし、多くは土壌の中にしみ込み、さらに深く基岩のすき間にしみ込んで一時貯留される。やがてこれらは地層の中を横流れし、地表を流れてきた水とともに溪流や湖沼などに至り、河川の流れとなって水圏の主体である海洋に注ぐ。その間、水の一部は生物に吸収され、その体内を通過して大気に返る。

わが国にもたらされる年間降水量は、全国平均で従来は約一八〇〇ミリメートル、ごく最近は少し減つて一七五〇ミリメートルとされている。それでも、世界的にみればその平均年降水量の二倍と多い。しかし、子細にみれば地域較差は大きく、九州・四国の南部や紀伊半島の南東部、北陸地方のやや内陸部などで三〇〇〇ミリメートルを超す多雨地域がある一方、瀬戸内地域から中部・関東地方の内陸部、東北地方の太平洋側沿海部、北海道東部などでは一五〇〇ミリメートル前後と少雨である。また、点状にはあるが、尾鷲や四国南部のように四〇〇〇ミリメートルを超える所も、北海道のオホーツク海岸地域や長野県の千曲川下流沿岸地域のように一〇〇〇ミリメートル以下の所もある。そしてまた、梅雨期とか台風通過時に大量の降雨が短時間にもたらされ、降雨強度は世界的極値（一〇分間一八〇ミリメートル、一時間四二二ミリメートル、一日一九〇九ミリメートルの例がある）よりは小さいが、年降水量の地域差にかかわりなく、非常に強いのも特徴である。全国的極値として一〇分間四九ミリメートル（高知県足摺・一九七一年九月十三日）、三〇分間八八ミリメートル（高知県足摺・一九六九年十月十七日）、一時間一六七ミリメートル（徳島県福井・一九七七年三月二十二日）、二時間二九六ミリメートル（高知県足摺・一九六九年十月十七日）、四時間四六七ミリメートル（長崎県西郷・一九八二年七月二十五〜二十六日）、一日一一三八ミリメートル（徳島県日早・一九七六年九月十〜十一日）などという驚異的記録が残されている。

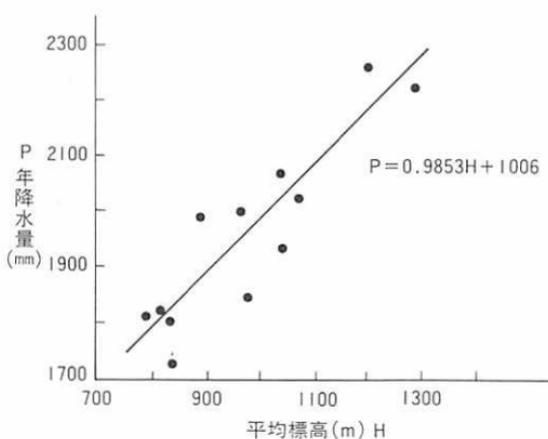
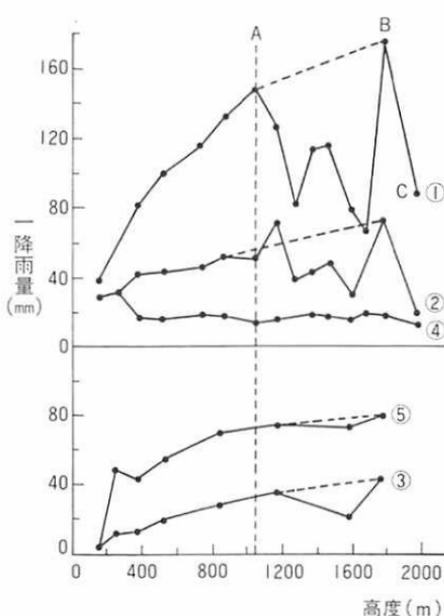


図3-1 同一山地の各小流域の平均標高と年降水量の関係(山村烈也・中野秀章 1985)

山地帯を主として国土の約六八%を占める森林地帯に限って平均年降水量をまとめてみると、全国平均値よりかなり多いと考えられる。図3-1にその例をみるとおり、標高が高くなるにつれて同一山地地域内でも年降水量が多くなる。このことは世界的な調査事例でも明らかである。図はアメリカ合衆国のノースカロライナ州の山地で、二一八五ヘクタールの試験流域の各地点において測定された例である。また、孤立峰の同一斜面で、一降

雨ごとに山頂の少し下まで標高とともに雨量が多くなる例が図3-2に示してある(降雨の原因によって程度の差はある)。山地では同一の降雨域内でも、少しでも風を伴う降雨などでは、高度のほか斜面の方位や傾斜、複雑な起伏などの地形の影響で、地点ごとの雨量にかなりの差を生じる。しかし高度とともに雨量が多くなるという事実は規則性が高い。

ところで、森林に降るのは雨や雪だけではなく、濃霧が森林に流れ込むと樹木の枝葉などに霧滴が付着を重ね、やがて大粒の水滴となつてしたたり落ちる。こ



注 { ①, ②, ③ : 低気圧, 不連続線による降雨
 ④, ⑤ : しゅう雨

A・B間の測点は急傾斜で、風のために雨量計の捕捉量が少ないので小さな値となっている。

図3-2 孤立峰の標高と一降雨量の関係(吉田作松 1951)

たのち、樹雨を中心に年降水量が三〇%前後、絶対量で四〇〇ミリメートル前後増加したことが報告されており、世界中の海岸に近い山地などの森林地帯で、樹雨現象による林内雨量の増加は無視できないものがある。

それを樹雨きさめという。アメリカ合衆国カリフォルニア州の海岸山地のマツ林で、ほとんど無降雨の夏期に平均数百ミリメートルもの樹雨量があり、極少雨地帯の年降水量が二ないし二・七倍になるといふ報告がある。わが国でも紀伊半島の大台ヶ原山地で、霧を伴う降雨で林内雨量が林外雨量よりも二〇ないし三〇%多くなるなどして、一夏の樹雨量が四四〇ミリメートルを超したとの観測結果が報告されている。林外雨量との比では問題は小さくても、絶対量としては地域によって見過せないものである。また、中国では亜熱帯地方の半島の荒廃山地帯で、広大な面積に広葉樹林が造成され

林冠などによる降水の遮断

森林に降った雨の多くは、林冠を成す樹木の枝葉や幹など樹体の表面に触れて付着し、あるいは枝葉の付け根などにたまって一時的に保留される。もちろん、枝葉のすき間を抜けて直接林床にとどく雨もある。これを樹冠通過雨量、あるいは直達雨量とよぶ。林冠に保留された雨の一部は、そのまま蒸発して大気中にもどっていくが、他の一部は重さを増し、あるいは風に揺れる樹体から大粒な水滴となって滴下して林床にとどく。これを樹冠滴下雨量とよぶ。残りのものは葉から枝、枝から幹へと伝い流れて林床にとどく。これを樹幹流下雨量とよぶ。樹冠通過雨量と樹冠滴下雨量を合わせて林内雨量とよび、林外雨量から林内雨量と樹幹流下雨量を差し引いた分は蒸発して気圏にもどるもので、これを樹冠遮断雨量とよぶ。森林に降った雪についても雨とほとんど同様の現象が起こり、一部は樹冠のすき間を通って林床に直達するが、多くは樹冠に積もる。積もった雪の一部はやがて落下し、一部は冠雪面から蒸発しつづけて大気中にもどっていく。さらに他の一部は融けて樹幹を流下することもあるが、寒い期間には、その量はきわめて少ない。

こうして林床にとどいた雨や雪はそこにある低木や下草、あるいは落葉層に触れて付着したり積



広葉樹（ブナ）の葉



針葉樹（ヒノキ）の葉

もったりして、再び一時的に貯留され、一部は蒸発する。このようにして、森林に降った雨や雪の一部は森林により遮断されて、降雨の最中から降雨が止んでしばらくの間に蒸発し、流水には加わらない。

ところで、遮断される量ほどの程度であろうか。それは森林と気象の諸条件によって違いがある。林木の枝葉の量や形態など、したがって、樹種や大きさや森林の構造などによって異なり、下木・下草・落葉層の量やその状態なども多少の関係がある。

また、当然、降水の強度・総量・頻度・継続時間などで大きく異なり、風・気温なども関係する。森林による降水遮断量、あるいは遮断率をいちがいにいふことはむずかしいが、一般的につきのことがいえる。すなわち、一降水ごとの遮断量は、細かい葉が非常に密で量の多い型の針葉樹では、平たい葉が



落葉広葉樹林（ブナ）



常緑広葉樹林（シイ、カシ）



落葉針葉樹林（カラマツ）



常緑針葉樹林（ヒノキ）

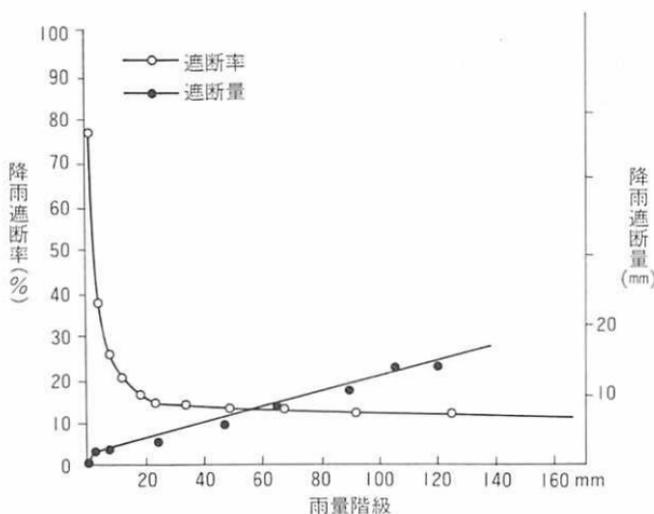


図3-3 カラマツ林の樹冠遮断率および量(村井 宏 1970)

疎に着く型の広葉樹より多い。また同じ樹種でも葉量の多い大きな樹木から成る森林では、その逆の状態の森林より多い。あるいは本数密度が低く、しかも個々の樹木の葉量も少ない老齢林では、同じ樹種の壮齢林より少ない。また、葉量その他諸条件に大差がない場合でも、落葉樹は常緑樹より年間遮断量は少ないなどである。

一降雨の雨量と遮断率ならびに遮断量との関係は、図3-3の測定結果の一例でみられるように、ごく微量の降雨の場合は別区分するとして、一降雨量が大きくなると遮断量も直線的に大きくなる。林外雨量に対する遮断率は微少降雨の場合は八〇%以上になるが、雨量が大きくなると遮断率はずっと小さくなり、数十ミリメートルの雨量では二〇ないし一〇%、一〇〇ミリメートルを越す大雨になると一〇%以下となることも多い。このような雨量と遮断との定性的な関係は森林のいずれ

の種類についても同様であるが、数値には当然、多少の差がある。なお、雪の遮断は水量に換算して比較すると、雨のそれよりおよそ数十%多いといえる。また、下木・下草、落葉層による遮断は一時的保留量がずつと少ないうえに、林冠で被覆されているため、上木の樹冠遮断よりはるかに少なく、一降雨ごとに数ミリメートル以下と考えられている。

こうして、代表的な壮齢の森林の一年間の遮断率は少雨地方で大きく、多雨地方で小さい。また、針葉樹林で大きく、広葉樹林で小さい傾向がほぼ明らかであるが、全体として、およそ一五ないし二〇%といえる。その分だけ流出水量が減少することとなり、例えば一〇〇ミリメートル前後以上の大雨時にも、森林の種類によって程度の差はあるが、およそ五ないし一〇%程度の遮断が考えられる。実際的な効果の程度は場合によって異なるとしても、その分だけ洪水流量の低減に役立つこととなる。

雪は、森林によって風向・風速を変えられた風の作用や林型・樹種・疎密度・樹高など森林状態の違いによって、一様な積雪を生じたり周辺に吹きだまりを生ずるなど、環境に大いに支配される。さらに、融雪は林内、とくに常緑樹林内では、林冠被覆による日射の減少や低温維持などにより遅延し、また、吹きだまりは自己冷却作用で融雪が長引くなどして、融雪水は林外より長時日にわたりにじつくり地表面にとどくこととなる。このことも水の循環と森林との関係を知るうえで見逃すこ

とができない。

浸透と流出

遮断を免れて落葉層のすぐ下の表層土表面に達した雨水・融雪水は、地表面をぬらし、そこに開口しているさまざまなき間から土壤中にしみ込んでいく。これを浸透という。森林土壌は大きさ・形状がさまざまな鉱物質粒子や落葉などの腐朽した有機物の微粒子、ことに両者の多様な結合でできた団粒が多く、その空間的配列のしかたによって細粗さまざまの間隙すなわち土壤孔隙を生じる。また表層土層では、樹草の根が枯れて腐ったり、土壤動物の生活活動によってあけられるなどしてできた、主として管状の孔隙も多い。森林の種類によっては例外もあるが、一般に土の容積の六〇七割までもがすき間で、常に水か空気で満たされている。したがって、立派な森林にとどいた水は一時間当たり一〇〇ないし数百ミリメートルもの速さで浸透することが知られている。

浸透した水は、粗い孔隙では重力で、細かい孔隙では毛管力で、飽和または不飽和のさまざまな

形で移動する。この移動は、土壤孔隙が一般に下層に至るほど、ほぼ層状に、小さくかつ少なくなっていることから、鉛直下方とともに地表面に沿う土層の方向にも起こる。表層で、側方に連絡する粗い孔隙が多い斜面で浸透水の多いときは、これらの土層に中間流、または側方浸透流とよばれる地中流が生じる。また、最表層で、とくに太い管状孔隙が連なっているときは、これを貫く流れ、すなわちパイプ流などとよばれる流れが生じ、一時間に数十センチメートルから数メートルといった速度で、斜面下方で湧出したり直接溪流に流出したりする。また、土層の深さにより大いに異なるが、平均で一時間に数センチメートル程度の速度で下方に透下し続けた水は、やがて土層最下部やその下の基岩の間隙層などに達して地下帯水層を形成し、そこでも側方への移動、すなわち地下水流を形成して、一日一メートル程度の速度でゆっくりと溪流に流出する。

しかし、その浸透能力以上の強度で地表に降水がとどいた場合は、浸透しきれない水を生じる。斜面の凹凸しだいでは一時貯留されることもあるが、地表面や落葉層に妨げられながら、地表流あるいは落葉層流となって流れる。さらに降雨が長引けば、斜面の下部では中間流水の集積で土層が飽和されたのち、その部分の地表で浸透できない降水の地表流が生じる。いずれも中間流よりはずつと速く、もちろん裸地面のそれよりはるかに遅い速度で流出して、溪流に注ぐ。

いずれにしても、地表に達した降水の多くは、多様な経路を経て、それぞれ著しい時間のずれを

もつて溪流に流出する。地表流と浅い中間流が、降雨中と降雨直後の相対的に大きい溪流流量の主体となり、直接流出とよばれる流れを生ずる。また深い中間流と地下水流が、相対的に小さいながら降雨停止後も続く、基底流出とよばれる流れを生ずる。なお、森林地帯といつても、流域には必ず溪流があり、また、露岩地や道路などのあることも多いが、これらの表面に降った降水はすみやかにそれらの表面を流出し、直接流出に加わる。

森林植生による蒸散

降水が土壌中に浸透したとき、わずかに毛管力で移動する程度の細かい孔隙に満たされた水は、樹木を初め、あらゆる植物の根に養分とともに吸収される。そして植物体中を上昇して葉の気孔や表皮のクチクラ層から水蒸気として大気中に蒸散する。毛管孔隙の水が植物に吸収されると、そのあとはまた浸透水で補給される。したがってその分土中の中間流出水が減少する。

蒸散量は樹種・森林構造・林齢などの森林条件や、日射・気温・湿度・風速などの気象条件・土

壤水分条件などによって大いに異なり、いちがいにいえない。しかし、主要樹種の壮齡林の蒸散量は水の高さで表して、生育期で一日数ミリメートル、年間数百ミリメートルのオーダーとされている。

前述の遮断蒸発・地表面蒸発に蒸散量を合計した蒸発散量は、樹雨を加えた降水量の流出分を減らすこととなる。その量は年間全国平均で、平均年間降水量一八〇〇ミリメートルの約三三%に当たる六〇〇ミリメートル前後とされているが、気象条件・森林条件の相異により地域的に大きく異なる。そして、その五〇ないし六〇%を蒸散量が占めるとされている。

川の流れを調整する森林

森林に降った雨や雪、林内で生じた樹雨が地表に達し、やがて溪流・河川の流れとなる過程は単純ではない。これを模式的に示すと図3—4のようになる。

まず、一部は林冠や下木・下草のすき間を通過し林床に直達するが、他はこれらに一時保留されながら落下し、あるいは、幹や茎を伝い流れて林床にとどく。すなわち、林床にとどく時間に差が

生じるわけである。

林床にとどいた雨水は落葉層を伝って鉱物質土壌の地表面に達する。降り積もった雪は少しずつゆっくりと融けるから、ここでも水が地表面に達する時間にかなりのずれが生じることになる。

地表面に到達した水の多くは土層に浸透する。しかし、到達する水が多いときには浸透でき

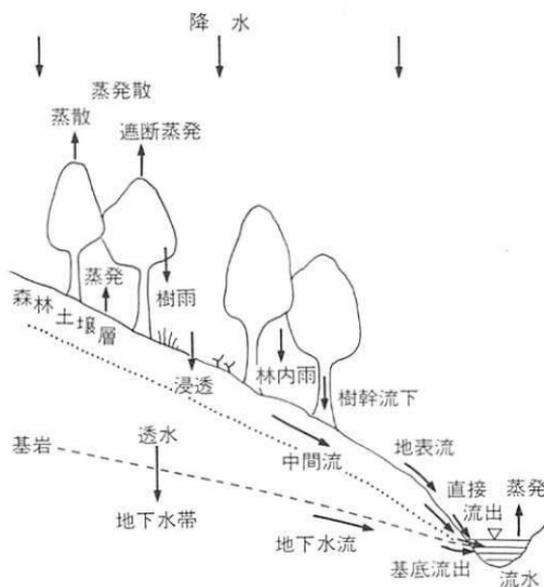


図3-4 降水の行方

ないものを生じ、地表を流れて溪流に注ぐ。このとき、地表にくぼみがあれば、そこに一時貯留され、あるいは、落葉層や地表の植生に妨げられながら流出して、それなりの時間がかかる。浸透した水は土層を下方に透下していくが、一部は土層中を中間流となって横流れし、その一部は、再び、地表に復帰するなどしながら時間をかけて溪流に浸出する。しかし、相対的には表層土層では速く、下層土層では遅く流出する。さらに、透下しつづけた水は、やがて基岩



ブナ林の林床

の間隙層に達して帯水し、地下水となり、きわめて長時間をかけて溪流・河川に流出する。

一方、土層に浸透した水の一部は樹木などで蒸散され、また、地表に毛管力で上昇したのち、林冠被覆による量的抑制はあるものの蒸発して大気にもどり、流出分に加わることはない。森林からの流出量は、蒸発散で失われる分だけ、林外降水量より少ないのが普通である。もちろん、ときに、樹雨で林内雨量が増すこともあるため、その小さな度合いが緩和されることもある。少なくなる程度は時と所で異なるが、全国平均で年蒸発散率は三五ないし四〇%、したがって年流出率は六〇ないし六五%とされている。

地中に浸透した水は多様な経路を経て溪流に流出するが、流出の速度が地表流と浅い中間流で相対的

に速く、はるかに速い渓流水面などの表面流出とともに、降雨・融雪中および直後の河川の流れを形成する。そして、深い中間流と地下水流の流出はかなり長引いて、降雨・融雪停止後の無降水時の流れを形成する。このため、降水が季節的・時間的に著しく偏っていても、溪流・河川の流れは年中絶えることなく、穏やかに継続することになる。しかも、流水の水質は人間の利用にとって好都合な安定したものであることが多い。こうして、森林地域を含む陸地における循環過程での水と人間はつき合いやすくなる。

4 土の中の水の動き

森の土は水を吸い込む——土壤の種類と保水力

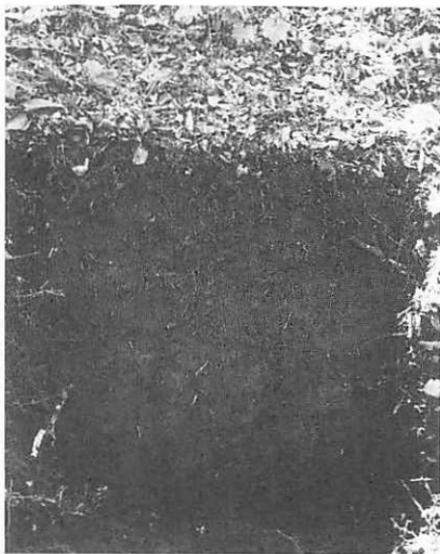
降水として林地にもたらされ、林内雨、樹幹流の形で地表に到達した水は、斜面であれば地表を斜面に沿って流下するものもあるが、残りは土壤中に浸透し、土壌水として挙動する。地表に到達した水は、その場で土壤中に浸透するか、地表を流下するかの違いは道の振分けられる。一定量の降水が林地に供給され、それが地表に到達したときに、どれくらいの量が土壌中に浸透するか、どれくらいの量が地表流になるかということは、土の中の水の動きにとって重要である。

ところで、土壌中にどれくらいの水が浸透するか、言い換えれば、土壌がどれくらい水を吸い込むかは、地表の状態、土壌の表面近くの孔隙組成と、その孔隙の中に今どれくらい水が存在しているかなどに左右される。ここで、地表の状態が問題になるのは、森林の下の土壌の表面には、多くの場合樹木や下草の落葉・落枝の堆積した堆積有機物とか堆積腐植といわれる層（ A_0 層）が存在し、

その堆積物の性状によって、水の浸透が良かったり悪かったりするからである。

地被や土壤による浸透能（水の吸い込み方）の違い

地表に到達した降水が、堆積有機物層を介して土壤（堆積有機物層に対して鉍質土壤といういい方もある）に浸透する浸透性の良否、水の吸い込み方の良否は、森林水文学では浸透能と呼ばれる。ところが土壤物理学では、地表から地中に水が入る現象を侵入（インフィルトレーション）といい、土壤中の水の浸透（パーコレーション）と区別する（この土壤中の浸透とは、土壤中を地表から地下水面まで水が連続して流れる現象だと定義されている）。そして森林水文学という浸透能に相当する用語は侵入能と呼ばれ、ある条件のもとで、土壤が吸収し得る最大速度と規定されている。ところで、森林水文学でいう浸透能は、中野秀章氏によれば、ある土地に強い降雨があっても地表流出が起こらないとき、その最大降雨強度に相当する浸透強度のことをいう。これは普通一時間当たりの水高（ミリメートル）で表される。林地の浸透能を現地で計測する方法はいろいろ考案されて



ブナ林の土壤断面

いるが、一般的な方法としては、傾斜地では一定の面積（30cm×30cmとか30cm×40cm）の方形の枠を地表に差し込んで、これに地表から一定の方法で注水（あるいは散水）して、枠内から地表流出する量を測定し、単位時間当たりの注水（散水）量から地表流出量を差し引いて、単位時間当たりの浸透量を求め、浸透強度とする。この計測をしばらく継続して浸透強度がほぼ一定になったとき、その強度を最大終期浸透能強度すなわち浸透能とみなす。このタイプの浸透計は傾斜地で使うのに適していて、山地浸透計（注水式あるいは散水式）と呼ばれるものである。平坦地や緩傾斜地では

このタイプは使いにくいので、円筒形の浸透計が用いられる。これは高さと同径が二〇〜三〇センチメートル程度の金属やプラスチック製の円筒を、上端の一部が地表に出るように差し込み、地表に出ている円筒部分に水を注ぐ。水が常に円筒内で自由水面を作るように維持しながら注水が続ける。注水強度が一定になったときの強度で浸透能を表す。この円筒浸透計では地表流下はないので、注水強度がそのまま浸透強

(最終浸透レートmm/hr)

林 地		伐採跡地		草 生 地		裸 地			
針 葉 樹		広葉樹	軽 度	重 度	自 然	人 工	崩壊地	歩 道	畑 地
天然林	人工林	天然林	攪 乱	攪 乱	草 地	草 地			
211.4 (5)	260.2 (14)	271.6 (15)	212.2 (10)	49.6 (5)	143.0 (8)	107.3 (6)	102.3 (6)	12.7 (3)	89.3 (3)
林地平均		258.2 (34)	伐採跡地平均 158.0 (15)		草生地平均 127.7 (14)		裸地平均		79.2 (12)

() 内の数値は測定した地区数

表4-1 地被区分別の浸透能 (村井宏ほか 1975)

度になるのである。

山地浸透計、円筒浸透計ともに、これまでにいろいろなタイプ
のものが考案され、使用されてきているが、傾斜林地で用いられ
ることが多いのは散水型の山地浸透計で、傾斜地の土中に方形枠
を差し込んで、その上に一定間隔に注射針を多数取り付けた散水
管を、一定の高さの位置に置いて、タンクに貯えた水を散水する
方式のものである。

このようにいろいろなタイプの浸透計を用いて、いろいろなタ
イプの森林や草地あるいは裸地、農耕地などの浸透能を比較した
事例は、これまでにかなりの数にのぼっている。

それらの中で、ここでは静岡大学村井宏教授が、岩手県と宮城
県で地目・植被・地形・地質・土壌条件の違う七五地区で浸透能
を測定した結果を引用する。それによると、表4-1に示すよう
に、林地が他の植被よりも明らかに高い浸透能をもっていること
がわかる。平均値で林地が一時間当たり二五八ミリメートル、伐

採跡地が一五八ミリメートル、草生地が一二八ミリメートル、裸地が七九ミリメートルで、林地では広葉樹林のほうが針葉樹林よりも浸透能が大きく、ブナ天然林が最大で四〇〇ミリメートルであったという。裸地では踏み固められた歩道は浸透能が極端に低く一〇ミリメートル前後である。

林地が他の地目、草地や畑地に比べて浸透能が大きく、林地の中では広葉樹林のほうが針葉樹林よりも浸透能が高いということは、他の調査事例でも類似の傾向が認められ、広く知られている事実である。ただ、ここで注意しなくてはいけないことは、地目別、あるいは植被別の浸透能を比較する場合には、調査対象地の立地条件、つまり地形や地質、土壤などの条件ができるだけ同じ所で比較することである。そうしないとデータの違いが純粹に植被の違いだけに起因するのか、土壤や地質などの立地条件の違いも反映しているのか、明確でなくなるからである。したがって、この種のデータを解釈する場合には、それがどのような立地条件の場所で調査されたものであるかを知っておかなければならない。

村井宏氏は、先に述べた表4-1のデータが地質や土壤などの土地条件は同一でないことを明確に断つたうえで、さらに進んで地質別、土壤型別、地形別などの浸透能の比較をしている。土壤型と浸透能との関係では図4-1のような結果を得ている。ブナを主とする広葉樹林地、カラマツ林地、アカマツ林地のいずれの場合も適潤性の褐色森林土B_D型と黒色土B_L型とが最大の浸透能を示し、

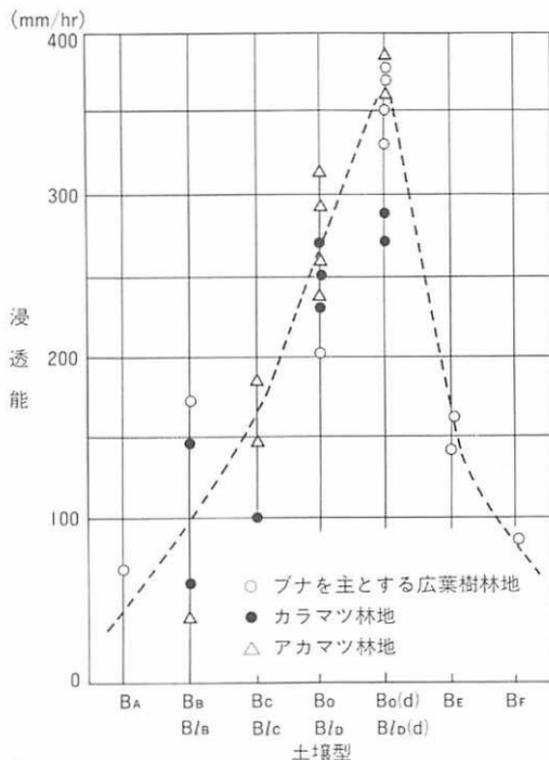


図4-1 土壤型別の浸透能の関係(村井宏ほか 1975)

乾性土壤（ B_A 型や B_B 型）で浸透能が低いのは、堆積有機物層（ A_0 層）やその直下の鉍質土層が菌糸束を多く含み、場合によってはマット状の菌糸網層を形成することもあって、これがいわゆる疏水性、潑水性をもって水をはじき、水の浸透を妨げるからである。一方、 B_F 型に属する湿性土壤では堆積腐植層が薄く、部分的には欠如して鉍質土層が露出していたという。こういう状態では表土の粗孔隙が微細な土粒子によって充填されて目詰まりした状態になり、それで浸透能が低くなっているものとみられる。

図4-1を一見して理解されるように、ブナを主とする広葉樹林地が浸透能が大きい、あるいは針葉樹林のほうが広

葉樹林よりも浸透能が小さいとはいえない場合もある。このことに十分注意していただきたいと思う。

土壤型の違いによる水の吸い込み方、つまり浸透能の違いの原因は、ひとつには土壤型によって違う堆積有機物層（A₀層）の性状の違いであることは、右の説明で理解されよう。

森林の地表面には樹木や下草の葉や枝が脱落してくる。斜面であれば重力や地表流下水の力で斜面上を移動することもあるが、地表面に落下して堆積した落葉・落枝はカビやバクテリアなどの微生物、ダニ、トビムシ、ヤスデなどの土壤動物によつて破碎、分解される。分解の過程が進行すると、腐植という名称で総称される暗色不定形の高分子有機物になって、鉍質土壤のA層・B層中に浸透し保持されて、いわゆる土壤有機物といわれる成分になるが、新鮮な落葉・落枝とそれぞれの分解の中間段階のものは、地表面に堆積して堆積有機物層（A₀層）を形成する。堆積有機物層が地表面を覆っているということは、耕地や草地、果樹や茶などの樹園地には見られない林地の大きな特徴で、土壤の水の吸い込み方の違いもこれに負うところが大きい。

この堆積有機物の層は、森林土壌学ではその分解過程の主要な段階ごとの形態的特徴によつてL層、F層、H層に分けている。L層は新鮮な落葉・落枝層でまだ破碎、分解をほとんど受けておらず、原形をとどめているものが堆積している層である。F層はL層の下にあつて落葉・落枝に微生物

物や土壤動物が取りついて破碎や分解がある程度進行して、落葉・落枝の原形をとどめていないが、細かい屑片が落葉・落枝であることは識別できる段階の有機物の堆積している層である。H層はF層やL層の下にあつて、もはや落葉・落枝の一部であることが判別できないまでに分解が進んでいて、暗色の微細な粉体になつてしまつてゐる。

ところで、森林の地表面に堆積している堆積有機物層が、どこでもこのL層、F層、H層から構成されているわけではなく、その堆積の厚さも場所によつてまちまちである。これは、供給される落葉・落枝がどんな樹種のものか、堆積している場所がどんな環境の所かによつて分解され方がかなり違うからである。ヒノキやヒバ、カラマツなどの落葉は腐りにくく、分解の中途段階の堆積有機物層が厚く堆積することが多い。ブナやミズナラなどの落葉広葉樹の落葉は分解しやすいといわれるが、これも場所によりけりで、排水条件がよく風がよく当たる尾根筋などの斜面で、ブナやミズナラ林の下の堆積有機物層が厚く堆積する場合もある。

堆積有機物層の堆積のしかたのこのような違いは古くから注目されていて、十九世紀末にはすでにデンマークのミュラーが堆積有機物層の断面の形態的な相違から、ムル型とモル型に区分している。このような区分はさらに細分されたりして今日でも用いられている。ムル型は落葉・落枝の分解が進行して、地表には堆積有機物の形ではあまり厚く堆積しない。特にF層、H層はほとんど認

められず、L層が薄く堆積しているものをいう。モル型はこれに対して、落葉・落枝の分解が急速には進行しないために、分解の中途段階の有機物がL層、F層、H層となって地表に厚く堆積したものである。先に示した例でいえば、ヒノキやヒバなどの針葉樹の落葉はモル型の堆積腐植を形成しやすく、ブナ、ミズナラなどの落葉広葉樹の落葉はムル型になりやすいが、環境によってはそうでないこともある。

一般に森林の下では、モル型にせよムル型にせよ、地表が堆積有機物の層で覆われている。林地の地表が堆積有機物層で覆われていることが、鉍質土層の孔隙の発達と維持にプラスに作用して、これが一般的にみて林地が他の地目に比べて浸透能が大きく、より多くの水を土壤が吸い込む結果につながるものとみられる。また、堆積有機物層それ自体が粗大な孔隙をたくさんもっていて、水が容易に吸い込まれ、それが鉍質土層の孔隙中に侵入する水の受け入れ口の役割を果たす。また一方では、この堆積有機物層があるために、樹冠層から落下してくる林内雨の雨滴の衝撃が直接鉍質土層の表面に加わることがなく、それが鉍質土層表面の雨滴浸食や構造の破壊による粗大孔隙の減少を未然に防いでいる。

ところが、林地の堆積有機物層が常に浸透能、水の吸い込み方にプラスに働いているわけではなく、先に土壤型別の浸透能の違いを説明した際に村井宏氏の調査例を引用してすでに述べた

地位	地区 No.	浸透能(最終浸透レート)		
		自 状	然 態 A ₀ 層除去	%
上	16	364	248	68.1
	17	387	222	57.1
	18	293	244	33.2
	平均	348	238	68.4
中	13	236	203	86.0
	14	260	199	76.5
	15	315	195	61.9
	平均	270	199	78.3
下	10	42	42	100.0
	11	153	183	119.6
	12	187	158	84.2
	平均	127	128	100.8

表4-2 アカマツ天然生林地における地位別の浸透能 (村井宏ほか 1975)

よって浸透能が逆に高まっている。しかし、このような水をはじく堆積有機物層をもつ土壌の分布範囲は、斜面上部や尾根筋などに限られているのが普通である。またこの種の土壌の分布範囲でも、全面水を吸い込まないわけではなく、局的に点在する大きな孔隙や亀裂の開口部から水が吸い込まれるものとみられる。

とおりである。B_A型、B_B型、あるいはB_M型の土壌はモル型の堆積有機物層をもっていて、それが水をはじくため降雨初期の浸透レートが著しく小さいという。村井氏は各種の土壌条件でアカマツ天然生林地の堆積有機物層を除去した場合と、自然状態の場合とで浸透能の違いを調べている。表4-1-2に示すように、一般的には堆積有機物層を除去したほうが浸透能が低下するが、堆積有機物層内および堆積有機物層直下に菌糸網層が発達したナンバー1-1の地区では、堆積有機物層の除去によつて浸透能が逆に高まっている。

土壌の保水力

土壌に吸い込まれた水は、土壌中を流動したり土壌の保水力の働きによって土壌中に保持されたりする。土壌の保水力は土壌中の大きささまざまな孔隙の配列（孔隙組成）に左右される。粗大な非毛管孔隙の中を動く水は、重力水として速やかに下方へ浸透するか、速い中間流となって側方へ流動するが、毛管孔隙の中を動く水（毛管移動水）は毛管張力が働いてブレーキがかかるために、動きが遅くなり、ゆっくり下方へ流動するか、側方へ流れるとしてもゆっくりしたいわゆる遅い中間流となる。毛管力が重力を上回るほど大きい場合には、毛管孔隙の中の水は重力にしたがって下方へ移動することはない。

土壌粒子の間のすき間すなわち孔隙の大きさを非毛管孔隙と毛管孔隙に区分し、さらに毛管孔隙を水が重力に従って移動できるかどうかで大小に区分すると、土壌中の水の動き、保水との関係がはっきりしてくる。非毛管孔隙は、普通十分に降雨があつたのち約一昼夜経過して、重力水が下方へ速やかに浸透してしまつたあとに、水で占められていない粗大な孔隙と考えられている（このとき土壌に保持されている水の量を圃場容量はじょうりょうという）。つまり、非毛管孔隙はいわゆる重力水の通り道

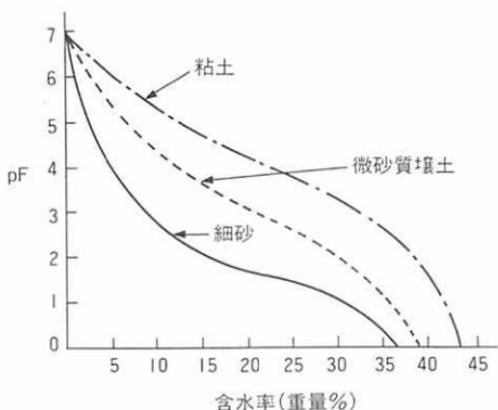


図4-2 粒径組成(土性)の異なる土壤の水分特性曲線(pF水分)曲線

で、水を保持、貯留する機能はあまりもっていない孔隙だということになる。この孔隙の大きさの下限は、直径一〇〇分の数ミリ程度に相当する。これ以下の細かい孔隙では、毛管張力の影響が大きくなって、水の流動する速さは遅くなる。そして直径〇・〇〇六メートル以下の細かい孔隙の中では、水は重力に従って下方へ動くことはないと考えられている。この限界点では水は五〇〇ミリバールの力で孔隙に保持されているとみられる。この水が動かなくなる限界点を毛管移動停止点と呼ぶこともある。また圃場容水量相当の水は、四〇〜六〇ミリバール以上の力で土壤孔隙中に保持されているとみなされる。このように孔隙の大きさと、そこに保持される水に働く保持力との間には一定の関係があるので、孔隙の大小の配分と、それぞれの大きさの孔隙の量を知るには、一定容積の土壤に最大限に水を含ませておいて、その水を吸引して排出する吸引法

によって、図4-2のような吸引圧—水分量曲線を描く方法が一般的に行われている(圧力の単位 pF は水柱高に換算した圧力の対数値で pF_{10} は水柱高一〇〇

センチメートル、 pe_3 は1000センチメートル、 pe_4 は10000センチメートルに相当する)。また、逆にサンプルを耐圧チャンバーの中に入れて加圧し、圧力—水分量曲線を描くこともできる。こうして吸引圧または加圧をしないで大きくして、各圧力に相当する水の排水量から、その水が存在していた孔隙の容積の全量がわかり、また各圧力に相当する孔隙の等量直径を求めることができる。等量直径とは、土壤中を縦横に、くびれたり、太くなったりしてつながっている大小さまざまな孔隙を、単純化して考えて、連続的に変化する大—小直径の毛細管の束の集合と考えて、ある圧力に相当する水分保持力をもつ孔隙の直径を表現する用語である。先に述べた圃場容水量相当、毛管移動停止点相当の孔隙の直径は、それぞれの圧力40〜60ミリバールが水柱高40〜60センチメートル、500ミリバールが約500センチメートルに相当することから算出した等量直径である。

土壤が水を一時的に貯留して徐々に排出する能力は、圃場容水量相当から毛管移動停止点相当までの、つまり等量直径 $0.05 \sim 0.08$ ミリメートルから 0.006 ミリメートル、大ざっぱには 100 分の数ミリメートルから 10000 分の数ミリメートルの大きさの孔隙が土壤中にどれくらいあるかによって左右される。

土壌のすき間と水の流れ

降水として地表にもたらされた水は、土壌の孔隙がすべて水で占められている場合や、土壌が疏水性をもっている場合を除いて、主として重力に従って土壌中に吸い込まれる。土壌には前節で述べたように大小さまざまなすき間すなわち孔隙があつて、土壌中に吸い込まれた水は、その孔隙の中を流動する。大きな孔隙の中の水の流れは速く、細かい孔隙の中では水の流れはゆっくりしている。流体は気体でも液体でも、近接した二点のそれぞれ $(p + \rho gh)$ という量に差があるときに流動する。ここで p は圧力、 ρ は流体の密度、 h は二点間の垂直距離、 g は重力の加速度とする。水は高さより低きにつき、気体は圧力の高い方から低い方に移動する。土壌中の水の移動にもこの数式を当てはめることができる。水で飽和した砂の層の中を流れる水の流量は、 $(p + \rho gh)$ の勾配に比例し、比例定数は砂の層の孔隙分布によって規定される飽和透水係数である。これはフランスの水道技師であつたダルシーが見いだした法則で、ダルシーの法則とよばれ、砂の層に限らず普通一般の土壌にも適用できることが明らかにされている。しかし、土壌が水で飽和している状態は、森林土壌ではグライ土の下層のような特殊なもの以外では、よほどの豪雨の直後でもないかぎり見

られない。自然状態の森林土壌では、降雨の有無の変動に従って、絶えず乾湿が繰り返されており、下層が表層よりも湿っていたり、あるときには下層が表層より乾いていたたり、層位ごとの乾湿、深さ別の乾湿も時々変化する。土壌に吸い込まれた水は重力に従って下方へ流動するほか、地表から蒸発し、植物の蒸散によって根から吸収される。こうした複雑な水の動きによって、土壌の乾湿は不均一になる。

湿った土壌と乾いた土壌を接触させると、水は湿った方から乾いた方へ移動する。水は水分ポテンシャルの大きい方から小さい方へ移動するのである。このような水の動きは、先に説明した水で飽和された孔隙の中の水の動きと同列には論じられない。飽和していない土壌孔隙の中での水の運動法則はダルシーの法則を拡張した形で説明される。その水の流量は $(p + \rho gh)$ の勾配に比例し、比例定数は水分ポテンシャル（水分量）によって変化すると考えるのである。ここで p はテンシオメータなどの水分計で計測される圧力で、土壌が湿っている場合には水分ポテンシャルの値に一気圧を加えた値と考えられる。土壌が乾いてきて水分ポテンシャルがマイナス一気圧以下になると、圧力は0気圧以下になり、ダルシーの法則で水の運動を論じることができなくなる。0気圧以下の圧力は、物理的意味をもたないからである。こうした場合圧力の代わりに水ポテンシャルを用いて考えると、不飽和の場合でも $\circ \sim \circ \cdot$ 三気圧のかなり湿った水分状態ではダルシー則がよく適

合するとされている。土壤がもっと乾いてくると、粘土粒子と水の間の相互作用が強くなってダルー則が適合しない例が多くなるといわれる。

不飽和土壤水の動きにとって重要なことは、先にも述べたようにダルー拡張則の比例定数が水分ポテンシャルによって変化することである。透水係数は土壤水分量の減少とともに大きく低下する。土壤が水分で飽和された状態から脱水されていくと、土壤全体の透水性を大きく左右している大きな孔隙の中の水から順に空気と置換される。したがって、ある水分量の土壤の透水係数は、その水分量のとくに依然として飽和している連続した最も大きな孔隙の中の水の流れに強い影響を受ける。

不飽和条件での水の動きについて、リチャーズのポテンシャル方程式が一九三一年に発表されていて、これも土壤の孔隙の中の水の動きを考えるうえで重要な式である。これは裸地状態の農地で蒸発が生じている場合を例にとると、ある深さの土層の一日の水分変化は、下方からこの層に入ってきた水量と、この層から上方へ出ていった水量との差に等しいと考えるのである。これは時間的、空間的に変化する不飽和土壤水の動きを表現する一般式だと考えられている。また別の見方をすれば、不飽和状態の土壤中の水の動きは、土壤の乾湿の差である水分勾配によって起こると考えることもできる。この考えにたてば、水は土壤中を湿っている部分から乾いている部分へ拡散すること

になる。ダルシー則の透水係数に相当する水分拡散係数を導入して、拡散方程式が提案され、透水係数と水分拡散係数との間の関係も明らかにされている。一九七〇年代以降電算機を使ってさまざまな条件下での水の動きが明らかにされつつあるが、山地斜面の土壌の各層位にまたがる水の動きを、統一的に説明する数式が得られる段階には至っていない。

植物の水吸収と土壤水との関係についても検討されているが、これについては、第5章で説明される。

森林の土は水をきれいにする

水源地帯の森林の中を歩いていると、溪流のせせらぎの水が、中流の農村地帯や下流の都市域を流れる水に比べて清澄なのに気がつく。事実、福島県と栃木県の県境を流れる黒川という川で、上流の森林地帯、中流の草地地帯、下流の水田地帯での水質の違いを調査した結果でも、見た目の清澄さだけでなく、水中の溶存成分の濃度にもかなりの違いがあることが明らかにされている(図4

13)。中流の草地地帯では畜産業が営まれ施肥や家畜のふん尿の影響があり、下流では水田の施肥や代かきなどの影響、人家の生活排水の影響を受けるから、こうした人為の影響が少なく自然度の高い上流の森林地帯の水質が良いのは当然ともいえるが、森林に限って考えても、そこにもたらされる降水や、林内雨、樹幹流、地表流、地中流に比べて、渓流水の水質は清浄で、しかも安定しているといわれる。京都大学の岩坪五郎氏が広葉樹の二次林で、降水が森林を通過して林内雨、地表流、地中流となり、最後に溪流に流出するまでの溶存成分濃度の変化を調べた結果では、窒素やリンとカリ、カルシウム、マグネシウムなどの塩基類とでは濃度変化に違いがあるが、渓流水の各成分濃度は林内雨よりも低く(図4-4)、林内雨によってもたらされた成分が土壤中に保留されるか植物に吸収されていることになる。岩坪氏らの調査では測定されていないが、樹幹流によってもたらされる成分も林内雨に劣らず多いことが知られている。

林外雨、林内雨、樹幹流によって林地にもたらされる物質は、森林内での水の動きについて先に述べた経路と同様に、地表流とともに直接溪流に流出するもの以外は、必ず一度は土壌中を挙動して、その一部が中間流、あるいは地下水とともに溪流に出る。土壌の孔隙に保持された水に溶けているイオンの挙動は、孔隙内での濃度勾配による拡散、水の流動に伴う分散、および土壌のイオン吸着特性に支配される。森林から流出する水が洪水時を除けば清浄に保たれるのは、土壌の持つイ

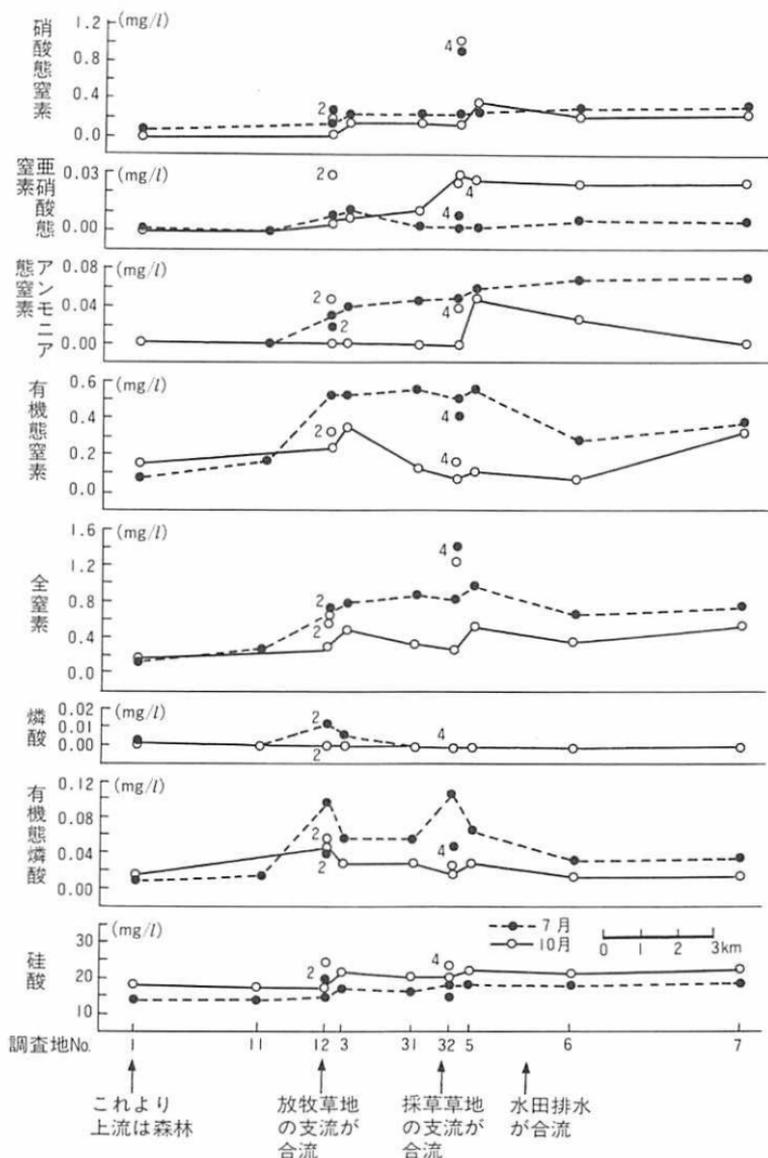
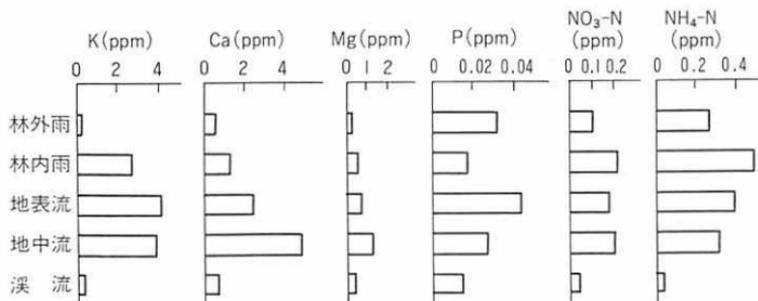


図4-3 栄養塩類濃度の河川の流下に伴う変化(東井純一ほか 1979)



林内雨：樹幹流を含む。地中流：10cm深

図4-4 森林各層の通過によって起こる養分物資の濃度変化(年平均)

(岩坪五郎ほか 1968)

オン交換能に負うところが大きい。腐植と粘土の複合体である土壤のコロイド粒子は、陽イオンを交換吸着することができる。土壤コロイドに吸着された陽イオンは、土壤中の他の陽イオンと交換される。土壤中のカルシウム、マグネシウム、カリウム、アンモニア態窒素などの陽イオンは、土壤のもつ陽イオン交換能によって土壤に吸着されていて、簡単に流出することはない。またアロフェン、イモゴライトなどのような非晶質、準晶質の粘土鉱物を多く含む火山灰母材の黒色土のような土壤では、酸度の低下によって水素イオンを取り込むために正電荷を生じ、陰イオンを吸着する能力（陰イオン交換能という）をもっている。林内雨や樹幹流として林床に到達した水は、さまざまな物質を含んでいるが、土壤中に保持されあるいは流動する間に、土壤コロイドとの間でイオンの交換があり植物に吸収されるものもあって、渓流水は低濃度の組成に維持される。

カビやバクテリアなどの土壤微生物やミミズ、ヤスデなどの

土壤動物も土壤水に含まれる物質を体内に取り込み、利用するし、植物は根から土壤水中に含まれる物質を養分としてきかんに吸収する。こうして土壤水に含まれる流出しやすい物質は絶えず生物に吸収されている。このことも流出水の水質のコントロールに寄与している。

土壤のもっているこのような物理化学的特性や生物活性性によって、土壤中に保持されあるいは交換されることによって、森林を流れる溪流河川の水質は安定しているのである。これが森林の土が水をきれいにするメカニズムである。

森林の土がもつこの特性を利用して、し尿処理水や生活排水の河川への直接排出を避けて水質をコントロールする試みが行われている。東京都の水源地である小河内貯水池では、レクリエーションの場を求める人々の入り込み数が増加し、汚水が河川に排出されて、湖や河川の汚濁が進行したために、生活排水中のリンを除去する必要があるから、森林土壤のもつ物理・化学・生物的浄化能力によってリンを取り除く試みが島嘉寿雄氏らによって行われた。汚水の二次処理水を林地に散布して、森林土壤に浸透して流出してきた水を三次処理水として、両処理水の総リンの量からリンの除去率を計算したところ、二次処理水の負荷濃度を二倍、四倍と増加させても、三次処理水（浸出水）のリン濃度はほとんど増加しなかったという。リンの除去率は汚水混入率が少ないとき、すなわち雨の多いときほど低く、汚水濃度が低いほどまた水温が高いほど低下するという結果が得られている。

	水量(mm)	Cl	NH ₄ -N	NO ₃ -N	org-N	total-N
降水収入	5644	114.2	5.2	8.0	13.7	26.9
し尿収入	244	1121.1	561.2	14.2	147.7	723.1
総収入	5888	1234.3	566.4	22.2	161.4	750.0
流出水支出	3329	128.2	0.7	11.3	6.1	18.0
収支決算	+2559	+1107.1	+565.7	+10.9	+155.3	+732.0
支出/収入率	56.5	10.4	0.1	50.9	3.8	2.4
	P	K	Ca	Mg	Na	(kg/ha)
降水収入	2.2	14.3	19.2	5.8	45.2	
し尿収入	67.3	153.5	20.0	21.3	391.2	
総収入	69.5	167.8	39.2	27.1	436.4	
流出水支出	1.1	21.0	26.1	12.6	121.3	
収支決算	+68.4	+146.8	+13.1	+14.5	+315.1	
支出/収入率	1.6	12.5	66.6	46.5	27.8	

表4-3 し尿水散布森林集水域における降水とし尿水による収入、流出水に伴う支出、収支決算、支出/収入率、調査期間1976~1980年(岩坪五郎ほか1982)

岩坪五郎氏は滋賀県田上山の治山造林地で大津市のし尿の二次処理水を散布して、肥料としての効果と、窒素、リンなどの除去による三次処理の効果を重ねた試験を行った(表4-3)。降水の含む物質の量に比べて、大量の物質がし尿処理水として森林の土に加えられたことになるが、流出はきわめて少なく、数字のうえからは、加えたし尿処理水の中の物質全部が、森林に留まっていることになるという。このことは、森林は外から加えられた物質を保持して流出させない働きをもっていることを物語っているようにみえる。しかし、細かくみるとアンモニア態窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムについては、処理水として加えたものが流出しなかったが、塩素や硝酸態窒素は

流出量が年々増加しているという。窒素の投入が毎年続き、土壌中の窒素量が增大すると、硝酸態窒素の流出の増大に伴って、カルシウムやカリウムの流出も増大し始め、酸度が低下し始めているという。先に述べた東京都小河内貯水池の汚水処理の例でも、無機態窒素は除去されずむしろ増加している。またリンの除去も、実施した実験条件では二〇年でその能力は限界に達するという。これらのことは、森林土壌のもつ物質吸着保持の機能は決して無限ではないことを物語っている。森林土壌のもつ水質浄化、物質保持の機能は、自然生態系のバランスのなかで維持されているのであって、不用意にこれを下水処理工場のようにみなして、汚物を持ち込むことは厳に慎まなければならない。

森林土壌の水質浄化機能は汚水処理に利用するのではなく、清浄な安定した水質の水を常時利用するための自然の給水システムとして利用したいものである。そのためには土壌を浸食や、物理性・化学性・生物性の劣化から守る土壌保全に十分配慮した森林の管理が必要である。

最近わが国でも酸性雨による森林樹木の衰退が問題にされ、酸性雨の実態や土壌、林木をはじめとする植物、湖沼への影響が調査されつつある。欧米各地で酸性雨による森林樹木の衰退や、湖沼の酸性化による魚類など水棲生物の死滅が大きな問題になっているのに比べて、わが国の酸性雨の影響はあまり顕在化していない。各地の降水の水質のモニタリングの結果では、わが国でも全国各

地でかなりの頻度で酸性雨が観測されているにもかかわらず、その影響が顕在化しないのは、降水量や気団の動きなどの気象条件が欧米とかなり違うし、窒素酸化物、イオウ酸化物の排出量も違うことなどのほかに、土壤条件の違いも大きく影響しているものとみられる。わが国の森林土壌の大部分は、多かれ少なかれ火山灰を含んでいて、アロフェンとよばれる非晶質粘土や準晶質粘土を含んでいるので、陽イオン交換能だけでなく陰イオン交換能をもち、緩衝能が高いことも原因だと考えられる。緩衝能の高い森林土壌が湖沼や河川の水質の酸性化を防いでいるものとみられる。

5 樹木の生育と水

生命の井戸水

木々の豊かな緑、清らかな溪流、涼しい木陰、こうした豊かな森の自然に接するとき、われわれは、植物と「水」のかかわりを感じる。不毛の砂漠、荒れ果てた貧相な乾燥地をみると、緑に不可欠な「水」の尊さを知る。

「水」は、われわれのまわりにはどこにでもあり、「水」がなければ生きていけないが、あまりに日常的なため、その大切さを忘れることがある。子どもに、水槽の魚に餌をやらなければならぬことを理解させることは簡単であるが、水槽の水をきれいにし、空気を十分に入れなければならぬことを理解させるのはむずかしい。

あらゆる生命は水の中から生まれ、長い進化の道を行くが、水から離れて生活する生命は存在しない。植物の種子は、からからに乾いているが、わずか数%の水を含んでおり、この水がな

ければ生きていけない。

植物は、土壤中の水分を吸い上げて茎や葉に送り込み、葉の気孔とよばれる小さな孔から発散する。この土から植物体を通して大気に流れる水の移動が十分に保証されているとき、植物は緑を保ち、成長を続けることができる。

地球的な見方からすれば、環境条件のなかで光は普遍的なものである。したがって、洞窟のような特殊な所を除けば、光の条件が植物の生死や生育を決めているとは思われない。赤道から極地向かって光の強さは減少するが、植物の生育期の日照時間の長さで補われている。温度条件も、赤道から極地に向かつて、あるいは標高の低い所から高い所に向かつて低下し、ある程度の規則性をもっている。植物の光合成生産にとって重要な二酸化炭素は、化石燃料の消費の増大に伴って増大しているとはいえ、地球規模でいえば地域差はほとんどない。

ところが雨の降り方となると、きわめて不規則であり、地域較差、年変動が大きい。極地のツンドラや高山帯を除けば、降水量さえ保証されていれば森林になる。しかし、不十分な場合はその雨量によって、砂漠、草原、低木林と多種多様である。植物が必要とする水の供給源は降雨であるが、雨が土壌に入らなければ植物は利用できない。したがって、植物はこの水を有効に利用する機能を備え、また、さまざまな適応機構をもって乾燥に挑んでいる。

植物の水吸収と土壌の水

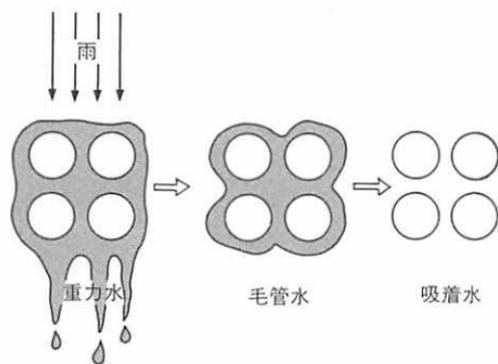


図5-1 土壌中の水状態

植物は必要とする水の大部分を根から吸収するので、土壌中の水の量と状態がたいへん重要な意味をもっている。まず第一に、土壌には一定の水を含む容量があり、容量を満たす以上に水が加わつても、余分の水は下の方に速やかに浸透し、その容量分の水しか土壌に残さない。したがって、この容量を満たす以上の雨量は重力にしたがって下方に移動し、土壌から流れ出る(図

5-1)。鉢植えの植物に水を与えるとき、ある程度以上水を与えても、鉢の底から水が出てしまうことと同じである。だから、土壌中に最大に水が含まれる量に対して、大雨でも小雨でも効果は同じである。雨が止むと、重力によるこの水の流れはまもなく終わり、一定量の水が土壌中に保持される。この水はおもに、土壌粒子間の毛管力によって引き止められている水である。すなわち、細いガラス管を水中に立てると、

管の中の液面が上昇するが、この細いガラス管の役割と土壤粒子間の役割は同じである。

植物が吸水できる水の大部分はこの毛管水である。毛管水を使いきってもまだ土壤中に水はある。この水は、土壤粒子と水分子とが分子間引力で結ばれている水、あるいは土壤粒子と化学結合している水で、その吸着力はたいへん大きく、植物の吸水力では切り離すことはできない。したがって、これらの水を植物は利用することができない（図5—1）。

では、土壤が水を保持する力はどう表されるだろうか。この力は、土壤水分張力とよばれており、一定の水分含量の土壤から水を取り除くのに要する単位当たりの力で表現する。単位は水柱の高さや圧力（バール）などである。なお、近年、いろいろな単位をSI単位系（国際単位系）に統一する世界的な動きから、よく使われる圧力単位バールをパスカル（Pa）で表している。例えば、天気予報や天気図などで大気圧をミリバールといているが、SI単位系では一〇一三ミリバールを一〇一三ヘクトパスカルとよぶ。しかし、パスカルという単位を日本で使うのは時期が早いとの気象庁の立場から、まだバール単位が使われている。

降雨後、重力によって水を失い、一定量の水を含んだ状態の土壤水分張力はおよそ〇・五バール程度である。蒸発や植物による吸水によって土壤が水分を失い、土壤水分張力が一六バールぐらいになると、植物は土壤から水分を吸収できなくなり、しおれてしまう。このときの土壤水分張力の

値を土壤のしおれ係数とよんでいる。

植物の水経済

動物は水を求めて移動するが、口から水を補給するため、ある程度まとまった水が必要である。植物は動物と違って移動することができない。そのため、根系を広げて、わずかずつ存在する水を集めて生活する。見た目では非常に乾燥した所でも植物は生きている。ひとたび根が伸びて水源に達すれば、水源が枯れない限り生活し続けることができる。

植物は自らの成長を二酸化炭素と水と光（光合成）にたよっており、二酸化炭素を葉に取り入れる必要がある。二酸化炭素を取り入れる気孔からは、必然的に水蒸気が出ていく。その結果、植物は葉から水分を失うから、つねに水分を補給し続けなければ生きていけない。この葉から水蒸気の出る出ていくことを、水面からの蒸発と区別して蒸散とよんでいる。

大きな樹木の場合、土壌から吸収して大気へ放出される蒸散量は、夏の晴れた日で数十リットル

から数百リットルにも及ぶ。吸収される水のうち、光合成によって二酸化炭素と結合するのは1%以下で、これに呼吸などの物質代謝に必要な水を加えても、吸収した全水分量の5%以下にすぎない。すなわち、九五%以上の水は、単に、樹体を通過するだけで大気中に放出されることになる。

湿度を考える——湿度六〇%は乾いている

すでに述べたように、葉から水蒸気の出ることが蒸散であるから、蒸散は水の蒸発と本質的に同じである。では、蒸散量は何によって決まり、どの程度なのであろうか。

蒸発、あるいは蒸散の原動力は、大気の湿度によって決まる。このことは、あたりまえのようになかなか理解しにくい。そこで、蒸発、蒸散と関係の深い湿度から説明しよう。

空気に含まれる最大の水蒸気量は気温によって変わる。例えば、気温三〇度の空気は最大で一立方メートル当たり三〇・三六グラム、気温二〇度の空気は一七・二九グラムの水蒸気を含むことができる。この最大値を超えれば、霧となったり、雨となったりする。すなわち、最大水蒸気量をも

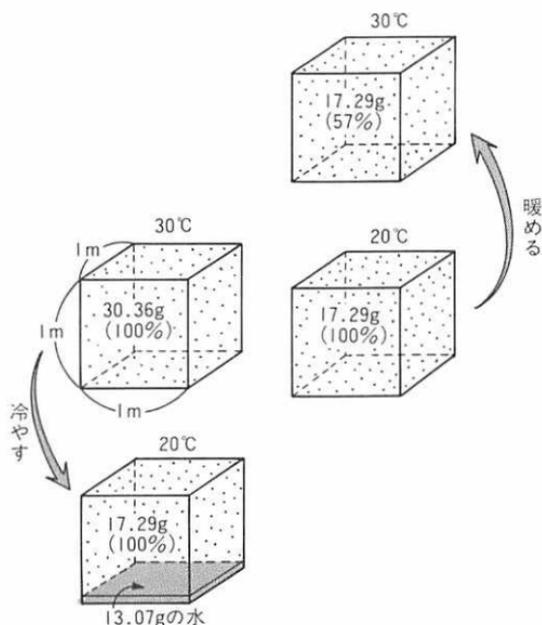


図5-2 大気の水蒸気の表し方

つ気温三〇度の空気を二〇度まで冷やすと、三〇・三六グラムから一七・二九グラムを引いた一三・〇七グラムの水蒸気が霧か雨となって液体になる（図5—2）。

では逆に、最大水蒸気量をもつ気温二〇度の空気を三〇度まで暖めた場合を考えてみよう。一立方メートル当たりの水蒸気量一七・二九グラムは、三〇度まで暖められても変わらない。三〇度の

空気は最大で三〇・三六グラムの水蒸気を含むことができるから、二〇度から三〇度に暖めた空気の水蒸気量は、最大水蒸気量の約五七%（ $17.29 \div 30.36 \times 100 = 57\%$ ）の水蒸気を含んでいることになる。この五七%というのが、われわれが普通に使っている湿度である（図5—2）。

次に、湿度六〇%の空気を考えてみよう。気温三〇度、湿度六〇%の空気は一立方メートル当たり三〇・三六

ラムに〇・六をかけた値、すなわち一八・二二グラムの水蒸気を含んでいる。気温二〇度、湿度六〇%の空気も同様に、一七・二九グラムに〇・六をかけた値の一〇・三七グラムの水蒸気を含んでいる。さて、ここで気温は三〇度と二〇度で異なるが湿度は六〇%と同じである。では、どちらの空気のほうが乾いていることになるのか。このことが、蒸発、蒸散と関係が深いのである。

湿度が低いほうが洗濯物がよく乾く、と信じられている。では、上に述べた空気ではどちらのほうがよく乾くのか。湿度が同じだから同じ、という答えにはならない。気温三〇度、湿度六〇%の空気のほうが早く乾燥する。なぜだろうか。

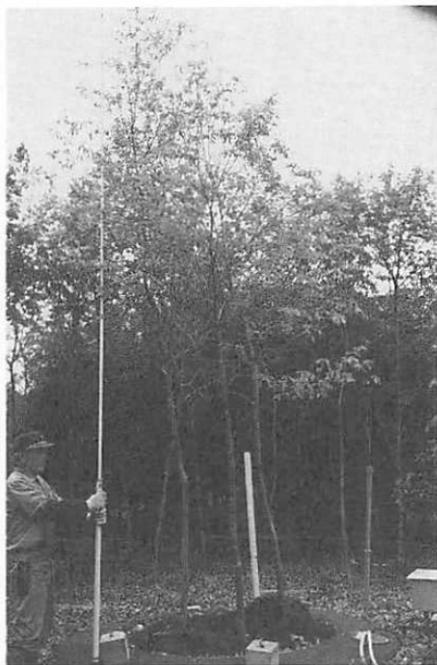
水が蒸発するときの原動力は、%で表される湿度ではなくて、大気の水蒸気要求度（飽差ともいう）で決まる。すなわち、その空気にあとどれだけ水蒸気が入れるかが問題である。前述の空気の例に従えば、気温三〇度、湿度六〇%の空気の水蒸気要求度は、最大に含まれる水蒸気と現在の水蒸気量の差、すなわち、 $30.36 - (30.36 \times 0.6) = 12.14$ 、一立方メートル当たり一一・一四グラムである。同じように、気温二〇度、湿度六〇%の空気の水蒸気要求度は、 $17.29 - (17.29 \times 0.6) = 6.92$ で六・九二グラムである。したがって、水蒸気要求度の高い気温三〇度、湿度六〇度の空気のほうが早く乾燥する。だから、蒸発量、蒸散量も多いことになる。

太平洋側の冬の大気を考えてみよう。冬は晴天が続く、乾燥注意報も出される。しかし、例えば、

気温五度、湿度三〇%のときの水蒸気要求度は、気温三〇度、湿度八三%という高湿度条件に相当するので、冬に空気が乾燥しても、蒸発・蒸散速度に大きな影響はない。冬の乾燥は、一週間あるいは二週間といった期間がきいてくるのである。

蒸散量はどう測るのか

蒸散量の測定は鉢植えの植物では割合に簡単である。鉢や鉢の土壌からの蒸発を防ぐため、ポリ袋で幹以下の部分を包めば、鉢植え植物全体の重量の減少は蒸散による水分の減少である。したがって、一定時間内の重量変化、例えば一〇分間、一時間、一日間の重量変化を調べればよいことになる。重量を調べたのち、葉の量を乾燥重量で求めたり、葉面積で求めたりすれば、葉重量当たりあるいは葉表面積当たり、一〇分間で、一時間で、あるいは一日でどれくらいの蒸散量かがわかる。しかし、この方法には大きな欠点がある。例えば、毎日一つの鉢について重量の減少量を調べたとする。最初の日の蒸散量と一か月後の一日の蒸散量は比較できるだろうか。一か月もたつと植物も



重量変化による蒸散量測定（森林総合研究所、竹内信治氏提供）

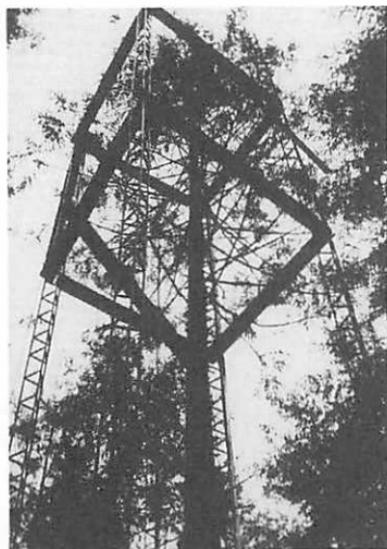
かなり成長している。すなわち太陽エネルギーを使って二酸化炭素と水から、成長のもととなる炭水化物を生産しているから、葉、幹、枝の量もかなり多くなっており、これらの重さの変化が測定する重量変化にかくれている。蒸散量は少なくなったのか、多くなったのか検討できないので、この方法は長期間の測定には向いていないし、鉢植えに限定される。しかし、近年、林のなかの大きな木にこの方法を応用している研究者がいる。ドラムかんの化け物のようなものに大きな木を入れ、重量変化から、樹種特性や林の状態での蒸散の特性を調べるのである。

大きな木の蒸散量はどう測ればよいか。木全体を透明なポリエチレンや塩化ビニルのフィルムで包み、このテントの下から空気を送り込んで、上から排出し、入り口と出口の湿度変化から一本の木の蒸散量を求める方法がある。かなり大掛かりであるが、包むことによってテント内の水蒸気要求度（前出）が自然状態

の空気と違ってしまふので、測定される蒸散量が自然条件下の蒸散量と違ってしまふ。この方法は自然条件下での大きな木の蒸散量の測定のための目的が果たせない欠点がある。

切り取った葉の重量を計り、数分後の重量減少量から葉の蒸散量を推定する方法がある。あまり時間がたつと葉の水分量の減少から気孔が閉じ、切り取る前の蒸散量と変わってしまうので、すばやく行う必要がある。測定後、葉の乾燥重量や葉面積を測定すれば、蒸散速度（例えば一グラムの葉が一分間にどれぐらい蒸散したか）が得られる。しかし、植物の種類によっては切った瞬間に気孔が急激に開くものもあるから、切り取る前の蒸散速度と切り取ったあとの蒸散速度が違ってしまふ欠点がある。近年、湿度センサーの発達から、小さな箱を葉にかぶせ、箱内の湿度変化から数秒間で蒸散速度を測る測器も開発されている。しかし、これらの方法は大きな木の樹冠部全体の蒸散量を推定するには向いていない。大きな木の樹冠部では、葉の位置によって、すなわち上部あるいは下部にあるかによって、あるいは陽葉、陰葉によって蒸散速度が違うから、この違いに対応した細かな測定を実施することは困難である。

木一本の蒸散量を調べる方法として、間接的な方法がある。すでに述べたように樹冠部の蒸散量に見合っただけ根系での吸水があり、その水はすべて幹を通る。したがって、幹内部の水の移動量を測定すれば樹冠部の蒸散量が推定される。移動速度の測定は、幹の中を流れている水を瞬間的に



大きな木について重量変化による蒸散測定と林内湿度変化による蒸散測定の組合せ

(米国ワシントン州にて)

暖めてお湯をつくる。そのお湯をつくった場所から一定距離下流で温度変化を測定し、お湯の移動速度から幹の中の水の移動速度を求める。川の流速は見ているだけではわからないので、ポールや板切れを浮かべて一定区間の移動速度を測ればわかるのと同じである。この水の移動速度にその測定部位における流れの断面積をかければ水の流量が求められる。実際の測定では、お湯をつくるためのヒーター、温度測定センサーは直径二ミリメートル程度の注射針で行うので、幹にあまり障害とならない程度の傷で測定できる長所がある。次の項以下に、この方法で求めた主な結果が載せてある。

森林全体の蒸散量を一度に推定することはたいへんむずかしい。森林に気象観測と同じタワーを建て、林内、樹冠部、樹冠上まで一定間隔に光エネルギーや湿度のセンサーを置き、樹冠部と大気の熱移動変化や湿度変化から森林の蒸散量を推定しようとする方法がある。この方法では、森林の樹冠部か

らの蒸散量、樹冠部に付着した雨が再び大気に蒸発していく量、林床植物の蒸散量や地面蒸発量が全部一緒に測られてしまつて、樹冠部だけの蒸散量を推定することがむずかしい。森林全体の水収支、すなわち、雨による収入、森林からの蒸発散による支出、河川への流出などのそれぞれの項について調べるのは向いているが、森林樹冠部の蒸散量だけを知りたいときには向いていない。

蒸散——一日の三〇分

朝になると光に反応して葉の気孔は開く。しかし、夜露が降りていることからわかるように、大気は最大に近い水蒸気を含んでいるから、水蒸気要求度は小さく、蒸散量も少ない。気温が上がってくると、この水蒸気要求度が増し、それに伴つて蒸散量も大きくなる。最も蒸散が盛んになるのは、水蒸気要求度の最も大きい午後二時頃である。ではどのくらいの蒸散量となるのだろうか。木一本の蒸散量は、木の樹冠部の葉の量によつて違ふから、木の大きさによつて異なるし、また、公園の木のような孤立している木と、林を構成している木でも異なっている。図5—3に三一年生の

ヒノキ林で調べた結果を載せてある。図からもわかるように、よく晴れた日には、胸高直径約二四センチメートルの木では一日におよそ四〇リットルの水を土から吸い上げ、蒸散している。この林全体では、およそ一日に一ヘクタール当たり三〇トンの水を蒸散していることになる。そんなにたくさんと驚くであろうが、数値は表し方によって、何とも思わなかったり驚いたりする。いま、雨量の表し方についてみてみよう。雨量はミリメートルで表す。例えば、雨量

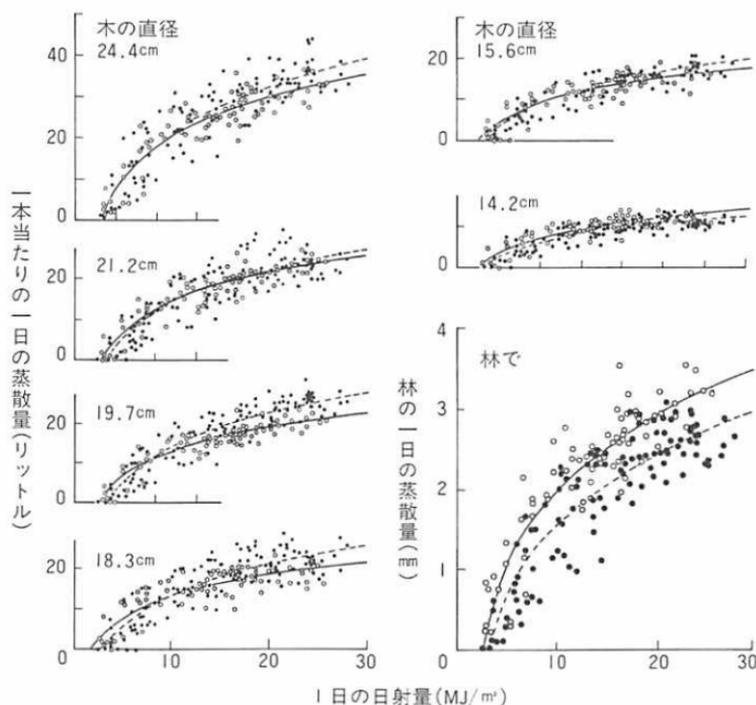


図5-3 31年生ヒノキ林の1本1本の蒸散量と林の蒸散量
 白丸と黒線は間伐前、黒丸と破線は間伐後

三ミリメートルということ、大きなプールでも洗面器でも、降雨によって水の深さが三ミリメートルになるということである。そして、この水の深さに面積をかければ水の量になる。たとえば、一ヘクタールでは三ミリメートルの深さの水は、三〇トンの水量になる。三ミリメートルと三〇トンでは同じ水の量の表し方であっても印象が違う。蒸散量も同じことで、一ヘクタール当たり三〇トンの蒸散量には、そんなにと驚くが、雨量単位で表せば、三ミリメートル程度ということになる(図5—3)。

蒸散量の多い月は、年間の蒸散量は

さわやかな晴天の続く初夏の頃と、太陽が照りつけて暑い盛夏の頃と、どちらが蒸散量が多いだろうか。四月から九月まで調べたヒノキ林についての結果をみると、五月の蒸散量がたいへん多いことに気がつく(表5—1)。この理由は、春から夏にかけての大気の湿度にある。日本列島はこの頃、大陸の高気圧の影響を受けて大気が非常に乾燥するという(大政正隆著『森に学ぶ』東京大

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	合計
間伐前(mm)	63.5	83.0	67.8	58.8	66.6	54.8	394.6
間伐後(mm)	50.7	69.2	53.0	44.6	53.0	40.7	311.1
減少率(%)	20.1	16.6	21.8	24.1	20.4	25.7	21.2

表5-1 31年生ヒノキ林の月別蒸散量

学出版会参照)。このため、大気の水蒸気要求度の高い日が初夏の頃に多い。すでに述べたように、蒸散は大気の水蒸気要求度によって決まるから、暑い夏よりもさわやかな五月頃に蒸散量が多いのである。さわやかに感じるのも、大気が乾燥して人の皮膚からの蒸発を促進し、汗をかいてもすぐ蒸発するからである。

森林全体の水収支からすれば、蒸散量は支出の項目として重要な位置を占めている。森林に降った雨の一部は樹冠部で遮断され、雨が止んだのち蒸発して大気にもどされる。遮断をまぬがれた雨は林冠のすき間から、樹冠部に付着する雨の最大容量以上の雨は樹冠部から、あるいは枝や幹を伝わって林床に到着し、土壤に吸収される。土壤に到着する前にさらに林床植物に遮断されたり、土壤表面を流れていくものもある。樹木は、土壤中の水を再び吸収し、蒸散によつて大気の水蒸気をもどす。大気にもどるこの蒸散量は、全降雨量のおよそ三〇％程度といわれている。しかし、水蒸気の形で出ていく蒸散量を定量的に測定した例はたいへん少ない。通常は、降雨量から河川への流出量などを引いて推定しているが、この引いた値には、先に述べた樹冠部で遮断された水の蒸発や地面からの蒸発、河川の流出量に表れない地下水などへ

なり、現実の河川流出量などから考えれば、およそあり得ない値である。今のところ、日本の森林では、表5—2中のおよそ三〇〇ミリメートルというのが妥当のようである。

種名	蒸散量(mm/年)	備考
スギ	260—500	芝本(1951)
	392—495	柴田(1955)
	1230	佐藤(1958)
	555—1000	中村(1964)
ヒノキ	193—294	芝本(1951)
	233—452	柴田(1955)
	970	佐藤(1958)
アカマツ	283	東京都水源林(1973)
	633—1242	柴田(1955)
	860	佐藤(1958)
クロマツ	880—1026	門田(1962)
カラマツ	280	東京都水源林(1971)

表5-2 森林の蒸散量

の消失も含まれるため、正確な蒸散量とならない。直接蒸散量を測ることがむずかしいので、鉢植えの苗などを用いて、重さの減少から一定葉量当たりの蒸散量を求め、その値を森林の葉量にかけて求めたりしている(表5—2)。この方法では、樹冠部の葉の位置による蒸散速度の違いや、樹冠部付近の水蒸気要求度と鉢植え苗で測定したときの水蒸気要求度との違いなどを補正することがむずかしく、過大な値となる場合が多い。例えば、表5—2中の一〇〇〇ミリメートルの蒸散量ということは、降雨量の半分以上が大気にもどされてしまうということに

間伐や枝打ちによって蒸散量は減るか

間伐や枝打ちなどの森林施業が森林の水収支に与える影響が話題となっている。例えば、間伐や枝打ちによって森林の蒸散量を抑制し、河川への流出量を増加させるといふ議論もある。しかし、森林施業と蒸散量の関係を直接に扱った研究はたいへん少ない。それは、すでに述べたように、森林の蒸散量を測定することがきわめてむずかしいためである。

森林状態にある樹冠部では、樹冠表層は大気の水蒸気要求度に応じた蒸散量が期待される。しかし、樹冠下層では、樹冠内部の葉の蒸散や林床からの蒸発のために湿度が高くなり、水蒸気要求度が減少する。そのため、樹冠下層の蒸散量は減少する。したがって、弱度の枝打ちによって樹冠下層の葉を落とすことは、樹冠全体の蒸散量の減少にあまり寄与しないことが予想される。若い一四年生のヒノキ林で、樹冠の葉を上層と下層に半分ずつ分けて蒸散量を調べた結果、上層の蒸散量が七〇%、下層の蒸散量が三〇%であった、という例がある。すなわち、樹冠下層の葉を全体の半分以上まで切り落としても、蒸散量は三〇%しか減少しないことになる。

間伐によって森林の葉量を減らし、蒸散量の変化を調べた例がある。三一年生のヒノキ林で二四

%の本数間伐を行った結果、蒸散量は二一%減少した(表5—1)。このことは、間伐の程度に応じて蒸散量が減少することを示している。しかし、間伐による影響を月ごとにとみると、蒸散量の減少率にバラツキがある。表5—1からも明らかのように、蒸散量の多い月は、間伐によってあまり蒸散量が減少していない。例えば、五月の蒸散量は間伐によって一六・六%しか減少していない。

間伐前の林は林冠が閉鎖しているが、間伐によって林冠が疎開される。林冠が疎開されることによって、樹冠部付近の大気は樹冠上層の大気にきわめて近くなる。その結果、間伐後残された木の蒸散量、特に樹冠下層の蒸散量が増大し、一本一本の木の蒸散量が間伐前より大きくなるため、林の蒸散量が大きくなる。この蒸散量の増加は、晴天日の大気水蒸気要求度の大きい日に促進されるため、間伐による蒸散量の減少率が五月のような晴天の多い月には小さくなる。

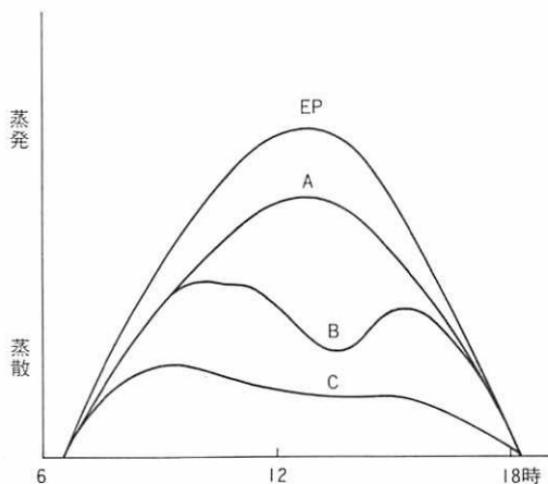
間伐による蒸散量の抑制効果は、長期的にみればあまり期待できない。弱度の間伐であれば、間伐後、すみやかに葉の量が回復して林冠が閉鎖するから、林の蒸散量は間伐前の値にもどってしまう。強度の間伐であれば、林床の植生が発達して林床植生の蒸散量が著しく増加するから、林全体の蒸散量が増大してしまう。

以上のことから、間伐や枝打ちなどの森林施業による蒸散量抑制効果は比較的短い期間に限られる。森林施業の水収支への影響としては、土壤攪乱による透水性の変化、林床植生変化など他の要

因を考えていく必要がある。

蒸発と蒸散は本当に同じか

蒸発や蒸散における水の移動は大気の水蒸気要求度に依存するから、蒸散は本質的に蒸発と変わらないことを述べた。しかし、水面と葉の表面からの水蒸気の移動は明らかに違っている。蒸散は気孔による植物の制御下にあるので、蒸発よりも複雑である。土壌水分や植物体内の水が十分にあれば、蒸散速度の日変化は蒸発速度の日変化とほぼ同じになるが(図5-4)、こうしたこ



ぬれたろ紙からの蒸発(EP)と水分が十分にある葉からの蒸散(A)と水分供給が日中十分に行えず気孔によって制御される葉からの蒸散(B:樹木, C:草本)

図5-4 蒸散の日変化を示す模式図

とはほとんど起こらない。土壌水分はしばしば不足するし、蒸散量が過大になると根からの水の補給が追いつかず、葉の水分が減少するので、葉の気孔が閉じることがある。したがって、大気の水蒸気要求度に見合ったほどの蒸散が起こらないことがしばしば起こる。この場合、見た目では植物に何も起こっていないようであるが、水分欠乏によって気孔が閉じるような状態にあるとき、その植物は水ストレスを受けているという。水ストレスについてはあとで述べる。

水の吸収と移動——一〇〇メートルも昇る

生きていくうえで欠かすことのできない水の問題を植物はどう解決しているのだろうか。一〇〇メートルもある大きな木の樹冠部の葉は、どのようにして水を補給しているのだろうか。水分は浸透によって植物の根毛に入り、蒸散によって葉から蒸発する。この水の吸収と蒸散は通常相等しく保たれている。では、この水を動かしている力は何だろうか。

葉が蒸散を始めると、葉に吸水力が生まれる。なぜだろうか。これらのことを説明するためには、

次のことを理解しておく必要がある。

植物の細胞にはいろいろな物質が含まれている。例えば、二酸化炭素と水から光エネルギーを用いて（光合成）つくられた糖類である。これらの物質の濃度が高いと、まわりから水分を吸収しようとする力が働く。細胞のまわりはほとんど純水に近い水なので、水分が細胞内に引き込まれる。この水を引き込もうとする力を浸透圧とよんでいる。細胞は水分を含んでどんどんふくらもうとする。しかし、細胞は硬くて強い細胞壁に囲まれているから、ある程度以上はふくらまない。かえって、水を押し出そうとする力となる。この水を押し出そうとする力を膨圧とよんでいる（図5—5）。タイヤに空気を入れれば、空気を押し出そうとする力がかかることと同じである。細胞が十分に水分を含んでいるとき、細胞が水分を吸収しようとする力と細胞が水分を押し出そうとする力は平衡している。この状態では、細胞への水の出入りはない。すなわち、浸透圧から膨圧を引いた値は0である。朝、まだ蒸散が始まらないときはこれに近い状態にある。

朝、明るくなってくると、葉の気孔が開き、蒸散が始まって葉から水分が失われる。水分がすぐに補給されれば、葉の水分、すなわち細胞の水分は失われないが、植物では水分はすぐに根から補給されないので、細胞の水分が低下する。すると、細胞が水分を引き込もうとする力（浸透圧）が、細胞が水を押し出そうとする力（膨圧）よりも大きくなり、細胞に水が取り込まれる。水が取り込

まれるこの力を吸水力と呼んでいる。すなわち、力関係で、浸透圧が膨圧より大きくなる。そして、浸透圧から膨圧を引いた値が吸水力である(図5-5)。これらの力は圧力単位のバールで表される。例えば、細胞の物質が溶け込んでいることによって生じる浸透圧が二五バール、水分を押し出すようにする細胞壁の圧力、すなわち膨圧が二〇バールであれば、二五から二〇を引いた五バールが吸水力である。日中は蒸散が盛んで、蒸散に対する吸水が追いつかず、葉の水分はさらに低下する。するとこの吸水力はさらに大きくなり、一〇バール、あるいは一五

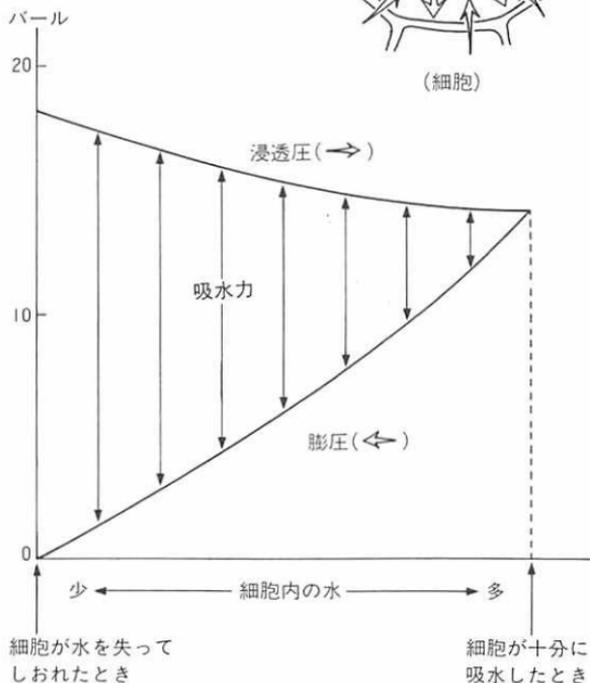
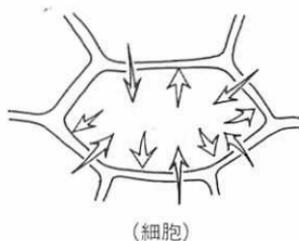


図5-5 植物細胞の浸透圧・膨圧・吸水力の関係



米国カリフォルニア州のセコイア。
樹高が120mにも達する。

パールといった値になる。この力は、根が土壤中の水分を吸収し、葉まで運んでくる原動力である。では、なぜ一〇〇メートルもある樹冠部まで水分が引き上げられるのだろうか。

水がそんな強い力で引っ張られているならば、根から葉までの流れの糸が切れないだろうか。水の分子は一個の酸素原子と二個の水素原子からできている。この水素原子はとなりの水分子の酸素原子と強く結びついている。これが水の凝集力である。コップに水を注いでいくと、こぼれる前に水はコップの縁よりも高く盛り上がる。これも水分子間の凝集力のためである。

この凝集力は細い管の中ではたいへん大きな力となる。細胞壁内の水、通導組織内の水は非常に細い管の中の水と同じであり、糸のような細い水の柱が引きちぎられて真空の部分が生じるためには一〇〇パール以上の力が必要であるという。したがって、葉に生じた吸水力には十分耐えられる。根から幹の通導組織を通って葉につながる細い水の糸が切れなければ、葉の蒸散に見合った水の補給が保証される。

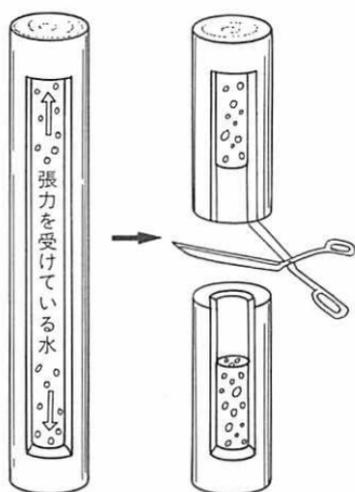


図5-6 張力を受けている水の切断

この細い水の糸が切れてその部分に空気が入ると、水の連続性が破れ、水は葉に補給されない。私たちは、経験的にこのことを知っている。切り花をさすとき、切ったまま水にさすと持ちが悪い。花や枝を切ってきて、もう一度バケツの水の中で切りなおして花びんにさすと持ちが良くなることを知っている。すなわち、水の中で切ることによって切り口への空気の侵入を防ぎ、花びんの水から切り口、茎の中、葉までの水の連続性を保つのである。もう少し詳しく説明しよう。すでに述べたように、自然状態では葉が蒸散をしているから、吸水力によって茎のなかの水は張力を受けている。そこで庭や花壇の草花を切断すると張力が急に解消されるから、切り口から空気が入ってしまう。ゴムを両手で引っ張り、真ん中で切ると両側に急激に引っ張られるのと同じである。だから、持ち帰って、空気の入った茎の部分を水のなかで切り落とせばよいことになる(図5-6)。

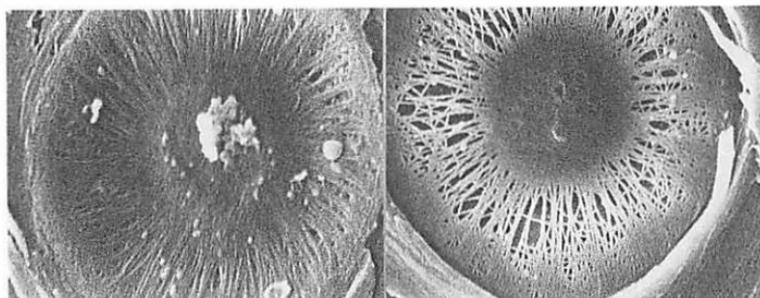
水移動の経路——壁の中、管の中を水は流れる

水移動の経路を土壤からたどると、水は柔細胞を通過して木部に入り、道管（広葉樹の場合）、仮道管（針葉樹の場合）を上昇して葉に到着し、細胞間隙から気孔を経て大気中に拡散される。

生きた細胞群を通るのは、初めの根の柔細胞と葉の柔細胞、葉肉細胞だけで、経路の大部分は死んで原形質を失った木部通導組織である。

大きな陸上性高等植物の存在は、この水移動を容易にする通導組織を備えることで初めて可能となった。生きている細胞から細胞へ浸透的に移動する水の動きは、個体内の上部へ水を供給するにはあまりにも遅すぎるため、維管束系を持たないコケのような植物は、地上をほうようにしか存在できない。

効率的な水の吸収と移動は通導組織ばかりでなく生きた細胞組



左：閉じた状態，右：開いた状態

スギの有縁壁孔の電子顕微鏡写真（森林総研九州支所 池田氏提供）

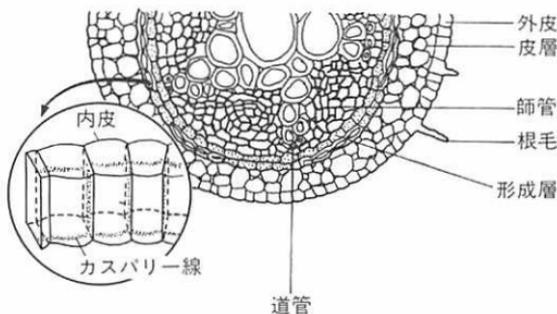


図5-7 若い根の横断面

対する抵抗がきわめて大きいのもこの不透水層のためであるといわれる。

水は内皮細胞から再び道管付近の細胞壁に入り、道管あるいは仮道管へと流れ、葉に到着する。したがっ

織内でも行われている。根では葉に生じた吸水力によって土壌から水分を吸収するが、水は表皮の細胞内に入るわけではない。表皮細胞の細胞壁から細胞壁へ、さらに皮層の細胞壁から細胞壁へと流れていき内皮の細胞壁に達する。ところが内皮を構成している細胞群の細胞壁にはカスバリー線という不透水層があり、ここで水は内皮細胞内に入らなければならない(図5-7・8・9)。細胞壁を効率よく流れてきた水がなぜ一度細胞内に入らなければならないのか、なぜ不透水層を備える必要があるのか、現在の生理学ではわかっていない。根での吸水に

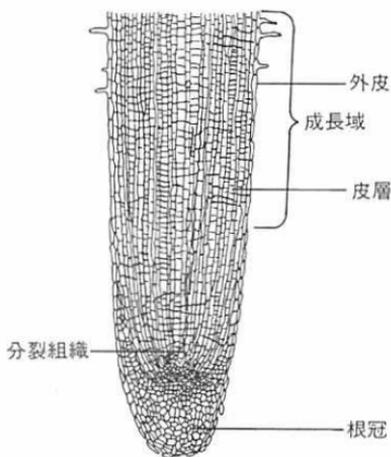


図5-8 根の構造

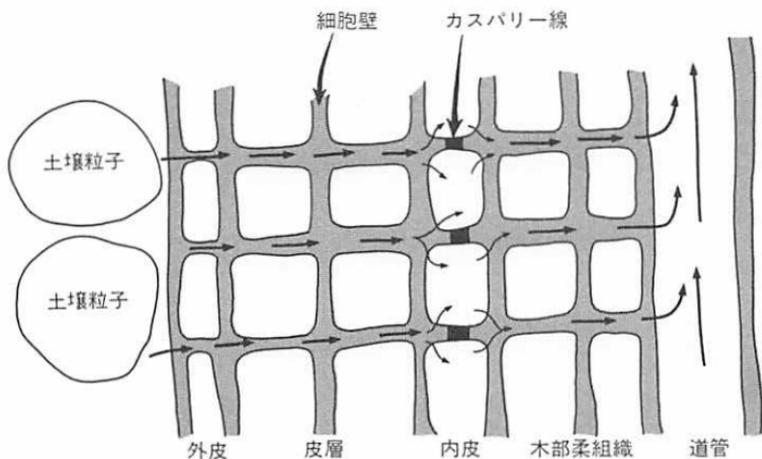
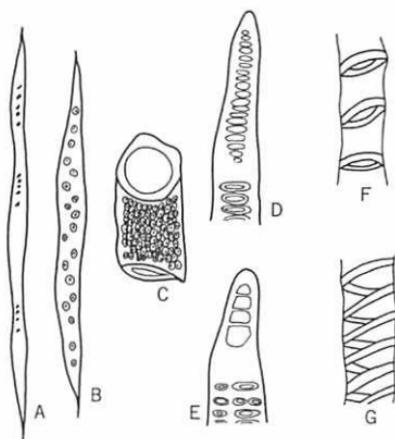


図5-9 土壌から道管への水の経路

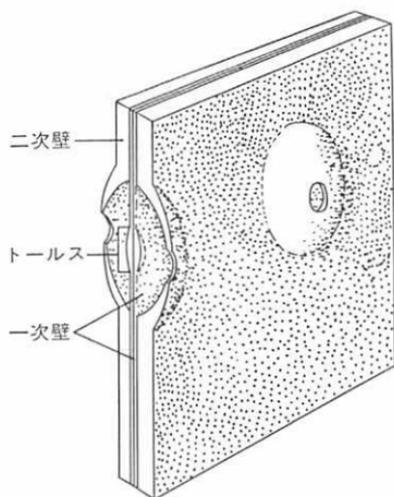


A : 繊維, B : 仮道管, C ~ E : 道管,
C : 単せん孔の孔紋道管, D, E : 階紋
せん孔の孔紋道管, F, G : 管状要素の
細胞壁の肥厚, F : 環紋, G : らせん紋

図5-10 管状要素と繊維の模式図

て、針葉樹の場合、大部分の水は辺材部の仮道管を通る。辺材部というのは、幹を切ったときに現れる外側の白い部分のことで、中央部分の赤みを帯びた部分を心材という。仮道管は長さが三〜五ミリメートル、直径が三〇ミクロンかそれ以下の紡錘形をした死細胞である(図5-10)。仮道管は成熟過程で細胞内の原形質が崩壊し、細胞壁は木化して、仮道管と仮道管は有

縁壁孔（図5—11）とよばれる部分でつながっている。仮道管から仮道管への水の移動はこの孔を通して行われている。病原菌や害虫などによって傷ができ、仮道管内に気泡が発生して水の連続性がこわされると、有縁壁孔が閉じて気泡を仮道管内に封じ込める。その結果、水はその周囲の仮道管を流れて、水の連続性を保証する。仮道管は針葉樹の体積の九〇%以上を占める基本的要素で、水分通導の機能とともに、肥厚し木化した細胞壁によって機械的強度を保つ機能も兼ね備えている。広葉樹の場合、水は道管を流れる。道管も仮道管と同じように原形質が崩壊したものであるが、崩壊過程で上下の細胞壁が消失した穿孔を通してつながっているので、直径が二〇〜八〇〇ミクロン、長さ数センチメートルから十数メートルとさまざまな大きさ、構造をもっている。道管は仮道管と違って水分通導機能だけを受け持ち、機械的強度は繊維という別の要素が受け持っている。クリ、キリ、ミズナラなど直径が大きく長い道管をもつ環孔材樹種では、気泡やチロース、ゴム状物質などによって閉塞されやすく、生育期の途中から水分の通導機能が低下しはじめて、一〜二年でその機能を停止してしまう。しかし、針葉樹の仮道管やサクラ、シラカンバ、トチノキなどの散孔材樹木の道管は数年間にわたって機能を維持しつづける。したがって、環孔材樹木の水移動の大部分はいちばん外側の年輪を使って行われているが、散孔材樹木や針葉樹では外側から数年の年輪が使われている。



手前から向こう側に水が流れるが、逆の場合、トールスが閉じてしまう。

図5-11 マツの有縁壁孔の構造

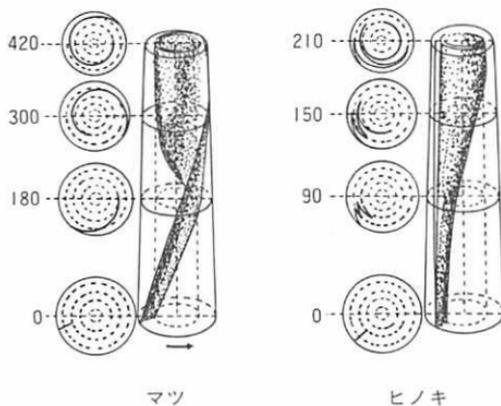


図5-12 幹の中での水の上昇 (Rudinsky & Vite' 1959)

道管や仮道管のつながり方が樹種によって違うので、水は幹の中を真っすぐ上に向かって上昇するわけではない。マツのようにグルグル回って昇るものからヒノキのようにジグザグで昇るものまでさまざまである (図5-12)。

水と成長

蒸散による水分の消費に対して、根からの吸水による補給はある程度遅れるので、植物体は水分不足を起す。土壤水分が十分にあれば、日中に生じた水分不足は夜間に解消されるが、土壤水分が不足してくると、植物は慢性的な水分不足状態になる。

植物体の水分不足は、光合成などの代謝機能を低下させるので、こうした状態を水ストレス状態にあるという。水ストレスは種によって異なり、また、同じ種であっても生育段階や環境条件の履歴によっても違ってくる。さらに、光合成、蒸散、物質代謝、器官の分化・成長といった各過程によっても、水ストレスの生じる水分不足の程度は異なる。

葉、幹、枝、根などの植物の器官の成長は、細胞数の増加と個々の細胞の拡大によって行われている。細胞の拡大の原動力となるのは吸水による体積の増加であり、植物体が水分不足の状態にあると、細胞内の水分が減少し、成長が妨げられる。植物の伸長成長や葉の拡大成長の低下はわずかな水分不足でも起きている。例えば、植物の成長にとって重要な光合成速度が影響を受けない程度の水分不足であっても、葉の拡大が阻害される結果、光合成を行う葉の量の減少のために、植物体

の成長低下を招くことになる。

一年生植物の場合、生育期を終えると多くは種子の形で次の生育期を迎えるので、水分不足の影響はその年の収量に表れるだけで、翌年の成長には関係がない。しかし、毎年成長を続ける樹木の場合、新しい

葉や枝の展開は主に前年の貯蔵養分に依存するので、水分不足は翌年以降の成長にも影響を与える。

樹木の特徴は高さや樹冠の広がりがある。高い位置にある葉は、葉と根の隔たりが大きく、葉の水分不足を起しやすく、慢性的な水分不足の状態にある。大きなユカリの木では、高い部位にある葉ほど小さくて厚い乾燥形態を示すことが知られている。また、木の高さは、環境条件の良い所では高いが、乾燥地に行くほど低くなることも知られている。光を求めて高さを維持する機能を備えた樹木は、草本植物との競争に有利な反面、高い部位の葉の乾燥問題に悩む矛盾を抱えている。



セントヘレンズ火山の爆発によって灰をかぶったモミの木からの新しい葉の展開（前年の栄養物質で成長し始めたことがわかる）

6 森林の水保全上の役割

森林の水保全機能とは

水は太陽・空気とともに人間の生存と生活活動にとって絶対欠かすことができない。水のさまじまな循環過程は、いずれも人間の生活に重要なかわりをもっているが、ことに、陸地におけるそれは、生産活動に利用し、また、生活活動の展開に適した自然環境を現出するなどの点で日常生活に密接なかかわりをもっている。なかでも、湖沼の豊かな水、溪流・河川の清らかで穏やかな流れのもつ意味あいは、はかり知れないほど大きい。

量的には恵まれているといえるわが国の降水は、季節的・時間的な偏りが著しい。そのために生じる河川流量の季節的・時間的な偏りと、せい弱な山地地質、急峻な地形がもたらす流量・水質の変動の激しさは、まことにつきあいがたい代物であった。そのため、具体的には洪水防止と渇水緩和の目的で、人為的な循環過程の操作として、世界第二位といわれる多数のダムが設置され、河川



最源流の山と川



最源流の森の中

流量の調節が古くから行われてきた。

しかし、本来、水源の山地流域そのものには、降水の時間的・季節的偏りを流出段階である程度調節する働きがある。水源流域の主体である山地の表層は、いわば分厚いスポンジで覆われていることになつてえられる。

元来、ここに到達した降水の多くは、表層土壌のすき間に侵入し、一時貯留されたのちに時間をかけて移動する。こうして地表を流出した一部とは時間のずれをもつて溪流に、降水の時間的偏りを緩和する形で流出するのである。

このような特性をもつ山地のほとんどは森林地帯であり、そこには、必ず、それを成立させる基盤としての森林土壌がある。森林土壌は非常に孔隙に富むので、その地表にとどいた水はほとんど浸透し、

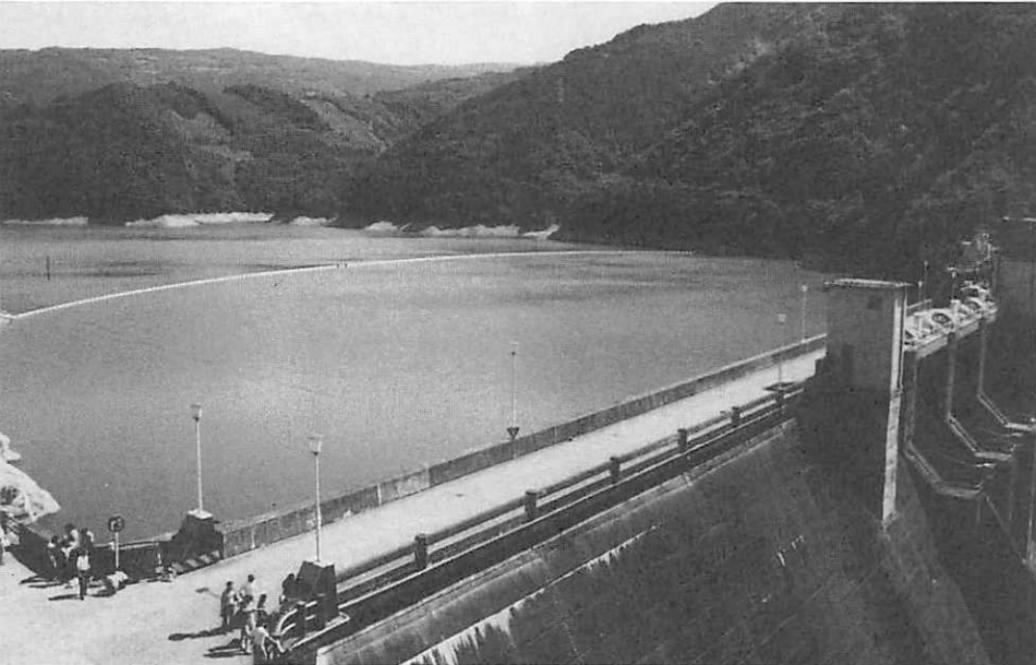


森をぬって流れる川



豊かな森から流れ出る川

一時貯留される。森林の土壌は、さらに下の基岩の間隙層への水の透下を進めて、前記の山体の働きを助長することになる。森林土壌の細・粗各種の孔隙量は、土壌の種類・堆積様式・地質・地形・標高などの地文条件や林種・林齢・疎密度などの森林条件によって異なるのでいちがいには言えないが、土壌の容積に対して、多い場合は六〇ないし七〇%前後を占める。この事實は、土中における水の一時貯留と流れにとくに重要なかわりのある粗孔隙量の測定事例から知ることができる。例えば、九州のある山地の尾根筋や急傾斜山腹の浅くて硬い土壌でも、貯留できるはずの雨量（ミリメートル）で粗孔隙量を表現すると、容積の二〇%前後に当たる二〇〇ミリメートル前後、山裾部や緩傾斜山腹の深くて軟らかい土壌では容積の二〇ないし三〇%前後で五〇〇



ダムとダム湖

ないし六〇〇ミリメートルとなっている。このような事実を、多目的ダムのダム湖の容量と、その流域の森林土壌の粗孔隙量との比較で示した試みがあり、それによるとダム湖容量の二四億立方メートルに対して四四四億立方メートルと一九倍にも相当するといふ。

なお、森林土壌で重要なことは、前項で述べたとおり、地表から下層にいくにつれて土壌層の性質が異なり、これらの層が山腹斜面にほぼ平行に存在していることである。すなわち、最上層位は落葉などとそれらが分解した腐植から成る有機物層(A₀層)、その下は有機物を多く含む軟らかい鉱物質土層の表層(A層)、その下は有機物の含有が少なくやや硬い下層(B層)、さらに、その下は有機物の含有はなく、風化した岩石の微細粒子の基層(C層)であ

る。いずれの層も水が浸透できる土壤孔隙をたくさんもっているが、下の層ほど孔隙は小さく、かつ少ない。つまり、孔隙性が山腹斜面にほぼ平行に層状に異なっていることが重要な事実である。

森林土壤の孔隙性は実に豊かであり、この大量の貯水可能な容量をもつ孔隙が、一時貯留とその後の溪流への流出、さらに一時貯留と流出変化の顕著な基岩帯水層への伝達にどのように作用するかが、森林がもつ流出調節機能の最重要部分である。しかも、水が孔隙を通過する際に、不純含有物の吸着・除去、あるいはある種のミネラルの溶け出しが起こる可能性もあり、流出水の水質調節にも大きく寄与することが考えられる。これら二つの作用によって、森林の水保全の働きの中心課題が果たされるのである。

森林土壤の働きほどではないが、地上部でも降水の一時的な貯留作用がある。林冠・下木・下草および落葉層による雨雪の一時保留である。ここでも降雨・降雪とは多少のタイミングを変えながら、雨水、とくに融雪水が地表面にとどけられることになる。そしてこれが流出のタイミングの変化にかかわってくる。

森林の地上部・地下部におけるこのような降水の一時貯留と流出の調節の働きは、ゲートの人為操作のない点でダムとは根本的に異なる。しかし、本質的にはダムと同種の作用であり、このことから、森林は緑のダムなどともよばれている。

一方、森林地帯では森林植生と落葉層によって遮断され流出しない水量がある。また、森林植生の蒸散と地表面蒸発など土壌水分の降水前消費によって孔隙が空になることがある。これが浸透水の保留を増加して、降水時の直接流出の低減にかかわり、量的な程度はともかくとして洪水流出の防止につながる。しかしこの作用は、水利用の面で総流出量が重要なときは負の効果ともなる。

要するに、森林地帯に降る雨は、表面流、地表流、中間流（側方浸透流）、地下水流に分割されて、大きな時間のずれをもって、しかも、全体としては長時間をかけて溪流・河川に流出する。そのため、短時間の激しい降雨や変動の著しい降雨でも、それよりずっと長い時間をかけて相対的に穏やかに流出する。その結果、継続流出の最大流出量と最小流出量の差が小さくなる。このような流出の状態のことを流出の平準化という。言い換えれば、降雨・融雪時の出水量が小さい、いわゆる直接流出量が小さく洪水流量発生のおそれが少ない一方、降雨・融雪が止んでからの流出量が大きい。すなわち、基底流出量が大きく、いつの時期にも使いやすい水の量が多くなることにつながる流出のしかたである。

水の流れをならす森林の土

ここで、流出の平準化の事実を多様な研究・調査の成果によって確かめてみよう。

まず、アメリカ合衆国テネシー州で、三七・五ヘクタールの小試験流域でかつて行われた試験結果をみてみよう。しばしば紹介されてきた成果であるが、非常にわかりやすく、しかも他に同種の研究が少ないことから、ここでも取り上げることにする。その試験流域はごく一部に樹林や草生が散在する程度の荒廢地から成る丘陵性流域であった。そこで水文観測を開始してから、簡易な治山工事を施工して、ある種のマツを造林し、二〇年後（一九四一—一九六〇年）にはうっ閉林が形成された。林床には落葉層と地表植生が豊かとなり、わずかながら表層土の孔隙性も改善された。その過程で、図6—1にみるように、荒れた流域の時期、幼齡林が成立した時期、およびうっ閉林が成立した時期に、それぞれ降り方と総量がほとんど同程度の降雨があった。これらの降雨による直接流出量とそのピーク流量が、治山工施工と幼齡林の成立、さらに、うっ閉林の成立によって明らかに低減され、直接流出の継続時間が延長された。この顕著な直接流出の平準化は、単位降雨量による直接流出量のユニットハイドログラフによってさらに明確に示され、洪水流量の抑制効果が

はつきり認められる。森林の成立などによる蒸発散量の増加とともに、表層土の透水性の改善による下層への透水量の増加が原因で、直接流出量の総量の著しい減少がもたらされたのである。また、一年間の直接流出量の合計量についても、三つの時期の、ほとんど同じ

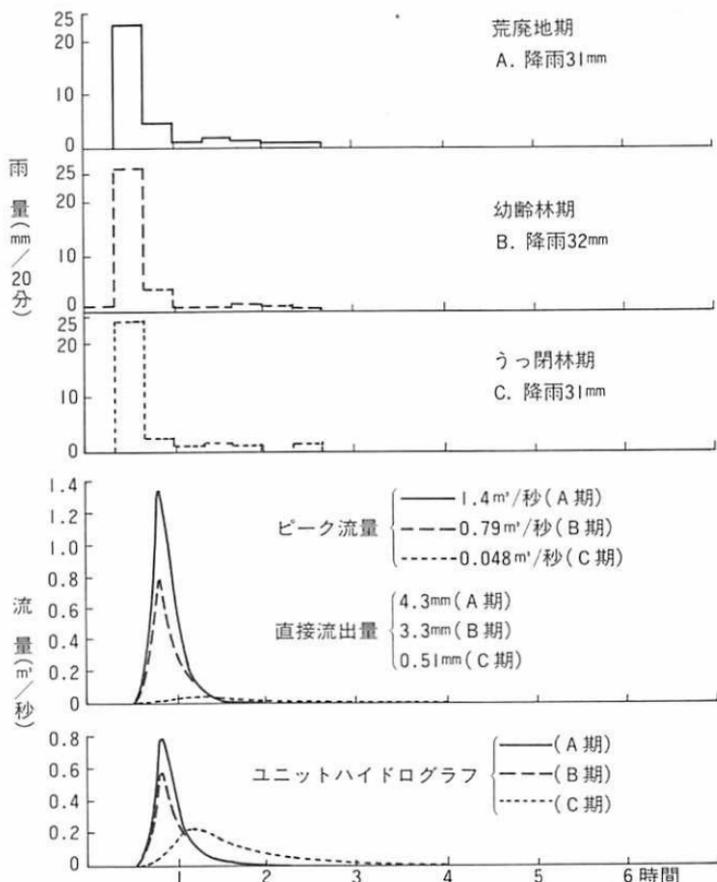


図6-1 治山造林による直接流出の平準化(アメリカ合衆国 TVA 1962)

年降水量の年について比較した結果、当然のことながら、荒廃地期のそれよりも、あとの二つの時期で明らかな減少が示された。重要なことは、一年間の基底流出量の合計量についても同様に比較したところ、荒廃地期のそれよりあとの二つの時期では増加の年がほとんどで、他の年は変化が明らかではないということである。

同様な試験結果が、わが国でも報告されている。東京大学の愛知演習林では、いわばはげ山の流域に治山造林を行い、クロマツやヤシヤブシなどから成る森林を成立させた。その五〇年間（一九二八—一九七七年）の初期・中期・後期に、たまたまほぼ同様な降雨があった。そこで、その流出を比較したところ、はげ山時期には降り始めると一時に流出して大きな最大流量に達し、降り止むと急速に減ってしまった流れ方は、後年にはじっくりと流出し始め、ゆっくり小さな最大流量に達してからも流出が続き、やがて直接流出から基底流出になっても、じっくりと流出が継続して、

やっと降雨前の流量にもどるといふ穏やかなものになった。この事実は、表6—1に示すように、



森林を失ったために浸食を受けた往時の瀬戸市の丘陵

降雨で増大した流量が降雨直前の流量に回復するまでの時間が、後年には実に七六倍も長くなった

観測時期	観測年	降 雨			回復時間 時 間
		総 量 mm	強 度 mm/hr	継続時間 時 分	
初 期	1934	39.3	12.8	13	2
中 期	1952	40.1	10.8	20 : 20	57
現 在	1975	32.1	12.5	15	153

表6-1 治山造林に伴う溪流流況の変化(諸戸精一ほか 1980)

ことからわかる。この場合も、主として落葉などの有機物層と表層土の浸透・透水性の改善の効果と考えられる。

いずれにせよ、治山工施工と森林植生の再生に伴う有機物層、表層土の浸透・透水性の向上が直接流出の平準化をもたらし、基底流出の改善にもかかわらずことが明らかである。

このように、森林によって、いわゆる一降雨による短期流出の平準化がなされるとすれば、短期流出の累計である長期間の流出についても平準化が進むはずである。つぎに、この森林の働きが、森林ではない土地と比べて明らかかなものであるかどうか。そのことを実証する調査結果の事例をみてみよう。

ブラジルのミナスセラエス州で、丘陵性の地形や地質などに大差のない近隣の二流域、すなわち天然広葉樹林流域(一一四・一ヘクタール)と、同じ天然広葉樹林を切り開いて造成した放牧草地流域(一九二・五ヘクタール)で流況の比較調査が行われた。図6-2からわかるように、

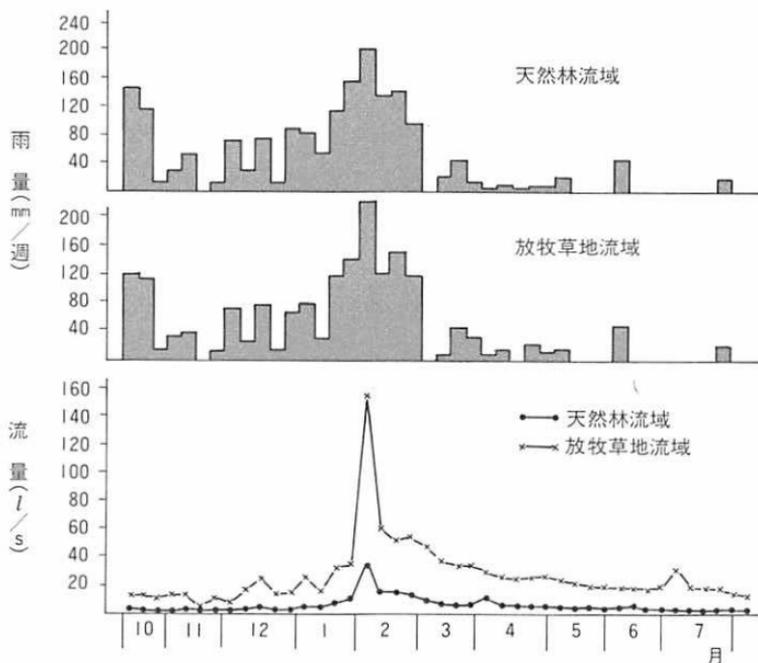


図6-2 天然林流域と放牧草地流域の溪流流況の比較(ブラジル Paulo Sant Anna e Castro 1980)

ほとんど同様な降雨条件に対して流況にはかなりの違いがみられる。全体として流出量が森林流域で小さいのは、蒸発散量の違いも関係していると考えられるが、流域面積が明らかに小さいことから当然である。しかし、際立った相違は、とくに二月の強雨に対するピーク流量の違いにみられるとおり、降雨強度に対する反応の差である。元来、同じ林地であったのに、草地への転換後二〇年程度で早くも森林時期の流出平準化機能の劣化が認められる。その原因は、草地化による有機物層の消滅と表層土層の孔隙量の減少などによる

浸透・透水性の劣化と考えられている。

また、かなりの広さの流域面積をもつ河川についても、同様に示唆に富んだ結果が報告されている。愛知県下の庄内川の、都市化の進んだ支流域と、森林を主とする自然支流域での、ほとんど同じ降雨に対する流量の変動を比較したのが図6-3である。

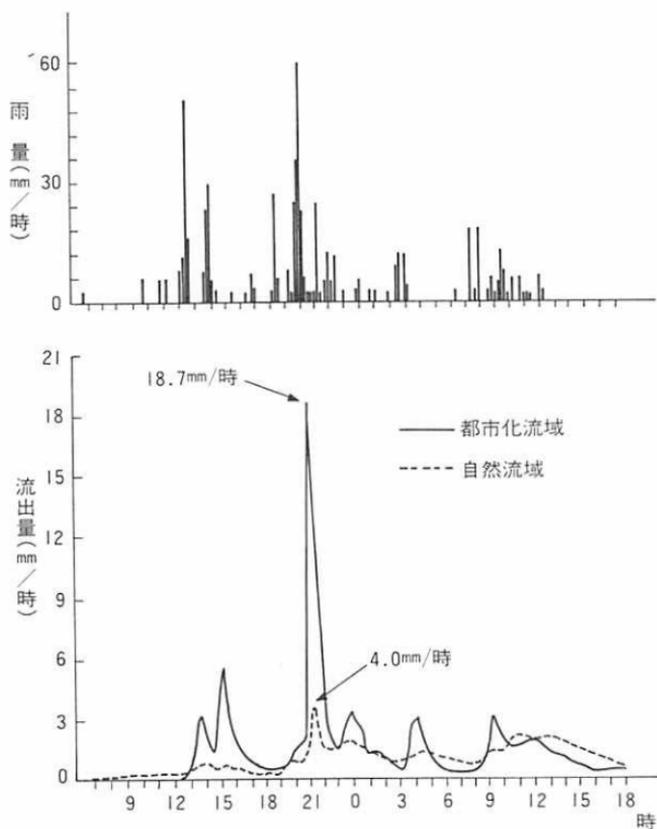


図6-3 都市化流域と自然流域の河川流況の比較(山口高志 1976)

る。愛知県下の庄内川の、都市化の進んだ支流域と、森林を主とする自然支流域での、ほとんど同じ降雨に対する流量の変動を比較したのが図6-3である。流域面積は都市化流域が一三平方キロメートル、自然流域が二六平方キロメートルと差があるほか、詳細にみれば地形・地質などにも

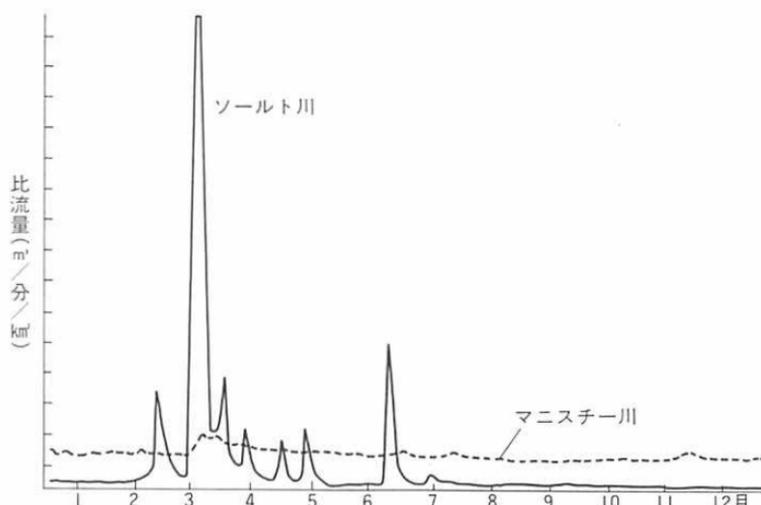


図6-4 深い透水性土層の流域と浅い難透水性土層の流域の河川流況の比較
(アメリカ合衆国 John D.Hewlett 1969)

差異がないわけではない。しかし、同一地域の近隣流域なので類似しており、この図に示すように降雨条件もほぼ同様と考えられる。それにもかかわらず流況には明らかな差がみられ、強雨時のピーク流量はいずれの場合も都市化流域で著しく大きく、逆に降雨が小止みしたときの流量は自然流域で明らかに大きい。この事実は、都市化流域では道路舗装や建築物などで透水性の表層が被覆されてしまったのに対して、自然流域では森林土壌のよりよい表層土層の浸透・透水性が維持されていることなどによって流出が著しく平準化されたことを明示している。

流出の平準化は地下水層に至るまでの透水性地層の規模・性質によって決まるが、これら

の事例から判断されるとおり、まず表層土の浸透・透水性によって左右されるといえよう。このことを端的に実証する事例を、前の図 6—4 にみることができる。アメリカ合衆国ミシガン州のマニスチー川とソールト川の年間流況には、年降水量がほぼ同様であるにもかかわらずかなりの違いがみられる。マニスチー川の流量は年間を通して変動がきわめてわずかで、最高度の平準化が示されているのに対して、ソールト川のそれは融雪と降雨に敏感に反応して顕著な変動をみせている。その原因は、マニスチー川流域には浸透能にすぐれ、透水性に富む深い土層が分布しているのに対し、ソールト川流域は氷河に運ばれた粘性漂土地域で、難浸透・透水性の浅い土層が分布していることにあると確証されている。この事例は、かなりの大流域においても表層土層の浸透・透水性が大きく流況を支配することを典型的に示している。

森林の状態と水の流れ

これらの結果から、森林流域における流出の平準化は、森林土壌の浸透・透水性の良否に直接か

かわっていることが明らかである。そして、その森林土壌を生成するのが森林植生である。森林植生は、水源流域の主体である山体の骨格を成す基岩の表層風化物層に、上から落葉・落枝などの有機物を恒常的に供給し、また、根系を表層から下層へ網のように張りめぐらしたり、土壌動物や微生物の生息を助長したりすることなどによって孔隙性、したがって、浸透・透水・保水性の豊かで安定した土壌の層を表層から下層に向けて発達させていくのである。しかも森林植生は、自ら生成した森林土壌を、林冠や落葉層および林床植生によって被覆し、雨滴浸食と地表流出水などの浸食から守り、また、強じんて多量な根系を伸張させて斜面の土層の粘着力・凝集力を補強して崩壊から守る。こうして森林植生は流出平準化の中心舞台をつくり、同時にそれを維持する機能を備えているのである。森林植生そのものの平準化への働きは間接的ではあるが、本質は根本的である。

そこで、森林のあり方と降水流出の平準化の間には、当然明らかな関係があるはずで、このことはつぎの調査結果からうかがえる。

東北地方で多くの河川の流況が調査され、それらの流域の森林状態との関係が調査された。すなわち、森林面積率が九〇%以上を占める流域の森林状態の良否を三階級に類別し、それら森林流域の河川の渾水時の流量、平水時の流量、洪水時の最大流量のそれぞれを一〇〇平方キロメートル単位で表した、いわゆる比流量の平均値を比較した結果が図6—5である。この図から、蓄積の大き

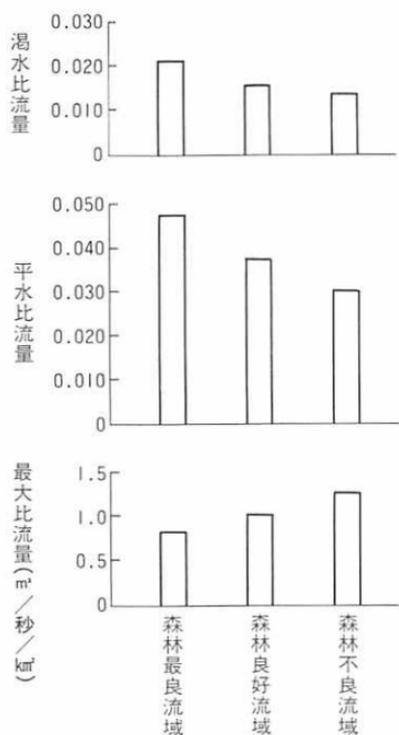


図6-5 森林の良否と河川流況の比較(白沢保美 1933)

い高齢林の占める率が高い森林最良流域の河川群は、若齢林などの蓄積の小さい森林不良流域の河川群に比べて、明らかに渇水比流量および平水比流量が大きく、逆に最大比流量が小さくて流量の平準化の程度の高いことがわかる。森林状態が両者の中間にある森林良好流域の河川群は、比流量がいずれも両者の中間にあり、森林の良否と流量の平準化との関係の深さを物語っている。これに類似した調査はソ連でも行われており、森林地帯を主とする流域の河川の夏・冬の渇水流量は、草原地帯を主とする流域の河川のそれに比べて三〇ないし七〇%多かったと報告されている。

また、多摩川の上流域では成長盛りのカラマツ・ヒノキの人工二段林を主に、一部に天然広葉樹林も混じえた流域（一九八〇ヘクタール）からの高水流出を、約一〇年間隔でそれぞれ数例測定し、出水の状況が比較された。比較の方法は一降雨による直接流出量の総量に対する一定時間ごとの逐次の流出量の百分率を縦軸にとり、

時間を横軸にとつて描いたグラフ、すなわちディストリビューショングラフを比較するものである。流域条件が一定で、降雨条件がある範囲で類似していれば、このグラフは類似する。したがって降雨条件が同じならば、流域条件の変化によってグラフが異なってくる。図6-6は、流域条件のうち、成長による森林の変化だけが考えられるわずか一〇年後に、ほぼ同様の降雨条件下での高水流出の出水時間が延び、ピーク流量が低下し、直接流量の平準化が進んだことを示している。

以上のように、河川流量の平準化をもたらす森林土壌の機能こそが、その森林土壌を生成し、維持する、森林のいわゆる水源かん養機能と治水機能の本質といえる。

森林植生のこの機能は森林土壌の生成・保持を通じての間接的なものであるが、実は、直接的な降水流出平準化の機能もある。それは多雪地帯における融雪水の流出の平準化の機能である。すなわち、森林は地表付近の風速を弱め、風向を変化させるため、樹冠遮断を免れた雪を林床に一樣に積もらせたり、逆に、林縁部などに吹きだまりをつくるなどして、林内あるいは周辺の積雪分布に変化を与える。しかも、林冠は林内の日射量を減じ、気温を低くするため、林内積雪の融解を遅延させる。また、林縁などに生じた吹きだまりの雪は、その自己冷却作用によって融解が著しく遅延する。このような融解遅延作用によって雪解け水の流出は、地表流出・中間流出・地下水流出のいずれの形をとるにせよ融雪段階でかなり長期間に遅延するため、その後の森林土壌による平準化が

さらに助長されることとなる。例えば、常緑樹を主林木とする森林のこの働きは、多雪では、雪代洪水しろのおそれがあり、しかも、冬期以外は少雨が懸念されるような地帯で

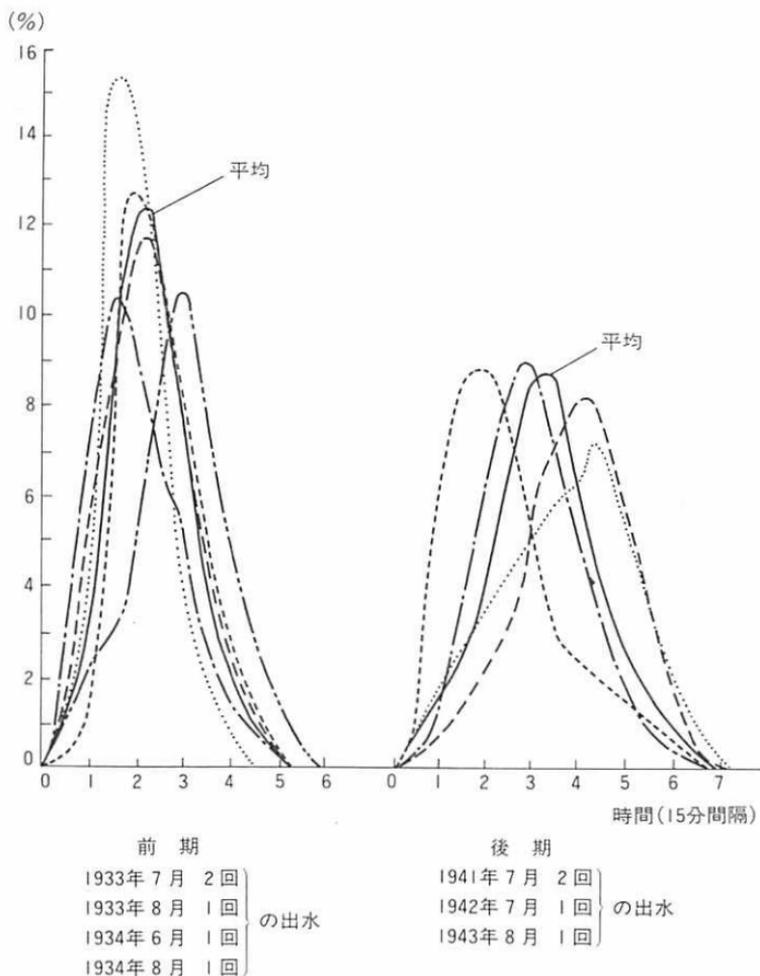


図6-6 森林の成長に伴う高水流出の平準化(平田徳太郎 1956)

は、重要な機能といえる。また、降雪遮断のきわめて少ない高齢落葉広葉樹林を主とする森林植生では、融雪抑制効果がほどほどであるため、真冬の積雪期の融雪は強く抑制されず、融雪期には抑制効果が多少は働くと考えられる。このような働きも、雪代洪水や夏期の少雨のほか積雪期の渇水の懸念の強い地帯では、見逃せない森林植生の直接的機能といえる。しかし、森林の雪水流出の平準化作用はいまだ明確に実証的研究がされておらず、今後の研究が待たれる。

うまい水もつくる森林の土

森林土壌や基岩間隙層によって流出水量の平準化が行われると同時に、流出水の水質の保全が行われることも忘れてはならない。これらの透水地層には、岩石の風化で生成された粘土や落葉・落枝の腐朽で生じた腐植などの、一グラム当たりの表面積、すなわち比表面積の非常に大きい微粒子が大量に含まれている。しかも、これらの微粒子はマイナスに帯電していて、物理化学的活性度が非常に高い。そこで、多様な物質を含有する降水がこれらの透水地層をゆっくり通過する間に、陽

イオンの吸着あるいは置換が盛んに行われる。また、森林植生が供給する有機物は、森林土壌を生活の場とする土壌動物や微生物によって分解されるが、流出しやすい可給態養分物質は不断に森林生物によって吸収される。一方、土壌および土壌母材中に含まれる微量要素で溶出するものもあり、また、森林流域の流出水の水温は高くなりすぎず安定的に維持されている。

これらのことから、結局、地中流出を主とする森林流域からの流出水の水質は、結果的に一定の組成に調節され、良質化・安定化されることが多い。このことは飲料水を初めとする各種用水の適当な水質の保持につながる。森林からの流出水は、一般に浄化されていて、衛生的に安全で悪臭・悪味を感じず、清らかで、酸性・アルカリ性のいずれにも偏りすぎることはない。しかも、おいしい水の条件としての各種ミネラル・酸素などの含有量が結果的に適当であることが多い。これは森林の水質保全機能の成果であるといえる。

森林による水の消費

森林には、林冠その他による降水遮断、生態系における生命活動の中心作用である蒸散および林地面蒸発によって降水の流出分を低減する作用があり、流出水量は降水量より少なくなる。水利用の面だけから考えれば、このことは森林のマイナス作用ともいえるが、森林のこの作用は地表に到達する太陽エネルギーの吸収を意味し、地表付近の気温や地温の異常な上昇を防ぐこととなる。森林の気象緩和作用といわれるこの働きは、生活環境の保全に最も関係が深く、森林の環境保全機能のなかでは評価の高い重要な機能である。

また、林冠の被覆は林内の微気象に変化をもたらし、蒸発の起る条件を抑制するため、林床からの水分蒸発が減少する。これらのことは流出水量を減少しないようにする方向に働く。しかし、結局、蒸発と蒸散による消失水量と、樹雨などによる増加水量との相殺の結果は、わが国では特定の小地域の場合を除いて、ほとんどの森林地帯では前者のほうが大であり、降水量より流出水量のほうが少ないのが通常といえる。このような意味での流出水量減少の作用は、森林流域に限らず、すべての流域で起こることであるが、各種植被流域の比較では、森林流域で最も減少量が多いとい

える。

もちろん、森林の水消費作用は、降雨時もしくは融雪時の洪水流出に際して、いわゆる出水の初期減量の形で洪水流量の低減に多少ともプラスの効果をもたらしている。しかし一方で、無降水期の流出水量の減少につながり、時にマイナスに作用することも事実である。とくに年降水量が一〇〇ミリメートル以下というような少雨年では、消費水量がその七〇％に達することもあり、流出の平準化が進んでも総量的に樂觀を許さない場合もあり得る。

しかし、わが国の大部分の森林地帯は多雨であり、この多雨森林地帯を主体としての全国平均の年間蒸発散量は年間降水量の三五％前後、少雨の年では、四〇％前後以上になることもあるが、これを差し引いた年間流出水量は、年間需要水量に対して、なお余裕がある現状と認めることができ。また、水源地帯の主要部分を占める高標高の山地森林地帯では、標高とともに年降水量が多くなるという事実がある。一方の年蒸発散量は地域ごとにほぼ一定量になるか、ときにはいささか少なくなきえなる。このことを実証する事例を図6-7に示してある。これは前述のアメリカ合衆国ノースカロライナ州の試験流域での例である。全国平均では少雨のアメリカでも、比較的多雨の山地では、標高とともに年降水量が明らかに多くなっており、逆に年消失量および年消失率は標高とともに明らかに少なくなっている。この傾向は他の地でも一般的に適用できるとされている。

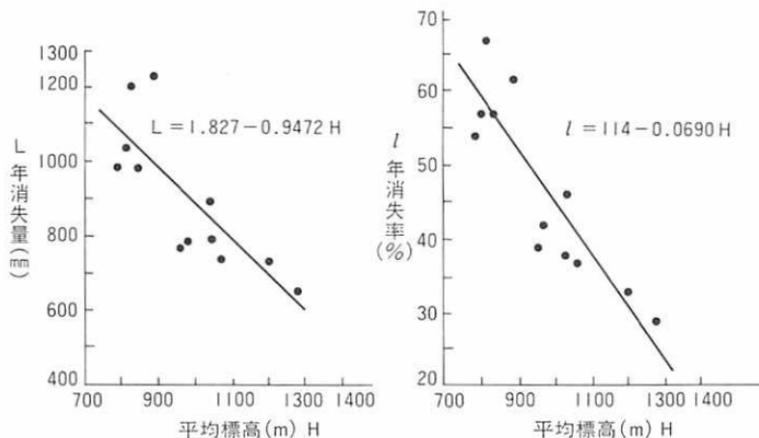


図6-7 同一山地の各小流域の平均標高と年消失量および年消失率の関係
(山村烈也・中野秀章 1985)

森林が水を消費するということの影響として、少雨で水需要の多い地帯では、とくに小流域の流出水の利用に当たって、森林の水消費に対して格別の対処を要する場合が考えられる。しかし、多雨地帯では、年間総流出水量の多少よりも流出水量の季節的・時間的偏りの著しさが重要問題で、森林の水消費量にかかわらず、流出平準化機能への期待が大きいのである。

7 水保全機能の高い森林

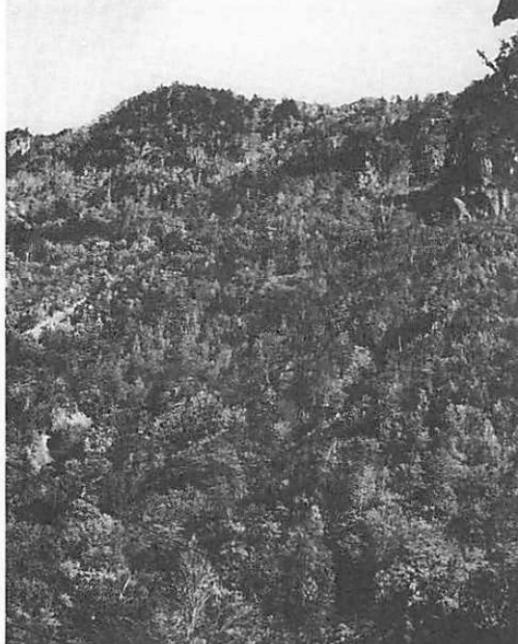
単純より混交、若齢より高齢がものをいう

水保全にかかわる森林の役割とは、自然の節理にさからわない範囲で、蒸発散量をなるべく少なくし、降水の流出を平準化するとともに流出する水の質を良好・安定に保つことといえる。

この両機能を果たす中心舞台は森林土壌であり、浸透・透水性にすぐれ、かつ厚い土層を保持している森林こそ水保全機能の高い森林といえる。概念的には、すでにある森林土壌を確実に保全し、かつ将来に向けて、なお、着実に水に関する特性の改善を進めている森林といえる。言い換えれば、地表浸食や崩壊などから森林土壌を守る機能が大きく、かつ浸透・透水性を改善する機能の大きい森林植生、すなわち、強じんな根系を深くかつ偏りなく網のように張り、崩壊防止に対する杭効果とネットワーク効果が高く、林床には落葉層や低木・下草が豊かで安定しており、地表浸食防止に効果が高い森林である。同時に有機物の供給と土壤動物・微生物の生息促進によって土壤の団粒構



ブナ林



針広混交林

造など、孔隙性を維持・改善する効果の高い森林が、将来性を含めて機能の高い森林といえよう。具体的には当該地域を適地とする複数の樹種・草種から成り、老齢に過ぎない範囲で高齢の大径木を主林木とし、樹齢・樹高もさまざままで、生態学でいう樹体の現存量が大きく、生態系として安定した生命活動の盛んな地域適応型の混交・複層林である。

わが国の水問題の焦点は、既述したように、降水の季節的・時間的偏りの著しい多雨のために河川流量の平準化にある。しかし少雨地域がないわけではなく、また水供給量に比べて水需要量の著しく大きい地域もあり、水利用の利便性を確保するため、年間ないし特定期間の総流出水量や平準化されたときの最低流量のより大きいことが望まれる場合もしばしば考えられる。したがって、森林の総合的効用発

揮に無理のない限りで、蒸発散量の少ない森林が望ましいことになる。この点では高齡林・落葉樹林が望ましい。

以上から、一般的に、適地適樹種、または落葉広葉樹の過老でない高齡林は機能の高い森林である。この事実を示唆する森林として、適地適樹種の落葉広葉樹と針葉樹から成る混交複層林の高齡林において、流出の平準化が高く、かつ、年間最小流量の増加が認められた事例がある。

山形県下の最上川上流域にある元国立林業試験場の試験流域で、林齡二七年生の針広混交人工林が七一年生の高齡林に成長した期間に、精細に降水量・流出水量の観測が行われた。この試験結果を図7-1に示す。まず、この四五年間の各年の年最小日流出量の経年変化をみると、年によって降水量に差があるため、当然、ばらつきが大きい。しかし、若齡期と高齡期で、ほぼ同様な年間降水条件の各年の年最小日流出量を詳細に比較すると、明らかに、後者のほうが大きい。全体としての長期平均傾向は、推計学的に信頼度も高い図中の実線で示すとおり、高齡期には若齡期の三倍強になる増大傾向がある。

一方、年最大日流出量も、当然ばらつきは大きい。全体としての長期平均傾向は、実線に示すとおり、一見してほとんど変化がないようであるが、実際の解析結果では、わずかながら減少傾向がある。事実、年最大日流出量に当日の日雨量が深く関係している場合について、四五年間の前半期

と後半期を分けてその関係をみると、後半期ではほぼ同じ日雨量でも、最大日流出量が前半期のそれより小さくなっている。つぎに、各年の最大日流出量と最小日流出量との比、いわゆる流況係数の経年傾向をみると、森林の若齢時期には非常に大きい比を含めてばらつきが大きいが、高齢化とともに全般的に比は小さくなり、かつ、

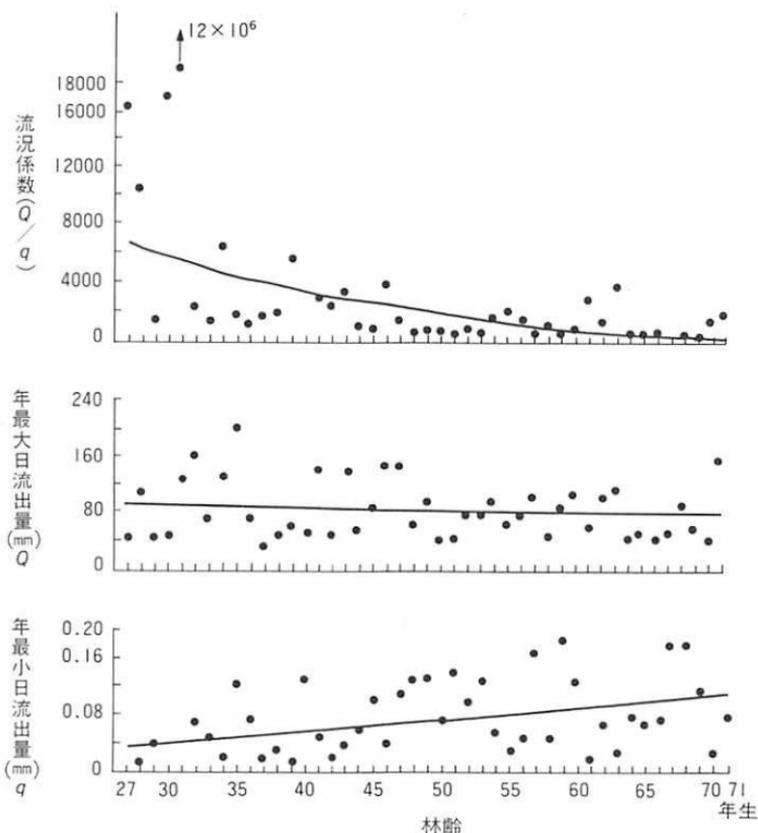


図7-1 針広混交林の高林齢化に伴う流出平準化(中野秀章 1985)

ばらつきも少なくなっている。河川流量の平準化のわかりやすい評価指標は年間の最大流量と最小流量の比、いわゆる河況係数であり、ここではこれに準じる流況係数を示した。係数はいずれも平準化が完全なときは一になり、小さい値ほど平準化の程度の高いことを示す。この図は森林の高齢化とともに降水流出の平準化が着実にすすんだことを明示している。

このように平準化が進んだ理由について考えてみよう。まず、高齢化に伴い林木本数は三〇%減少したが、総蓄積は五倍強に増加したことから、長年月にわたる根系の発達が明らかである。また、

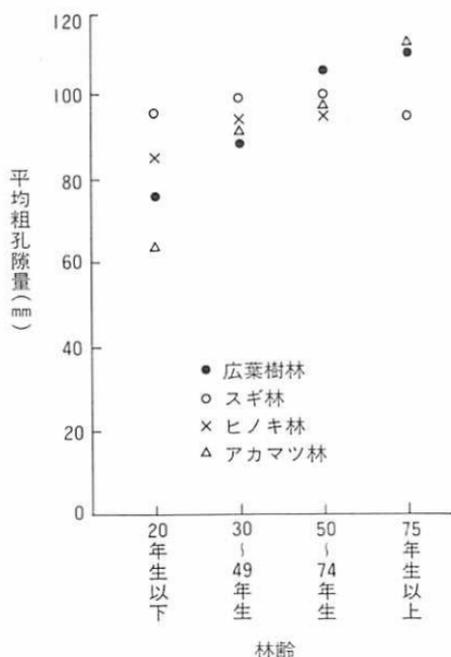


図7-2 林齢と粗孔隙量の関係(竹下敬司ほか 1977)

この間における落葉などの有機物の恒常的供給によって、表層土はもちろん、ある深さまでの土壌の孔隙性、したがって浸透・透水性の改善があったことが考えられる。この場合には、土壌の孔隙性についての調査は行われていないが、一般に高齢化とともに粗孔隙量が増すことは、九州のある森林地帯

で調査された事例(図7-2)などによって実証されている。ただし、この事例ではスギは七五年生以上で粗孔隙が減少した結果になっているが、このことが一般的かどうかについてはいまだ明らかでない。

図7-1に例示した試験地では、森林生態学で通常いわれているように、四〇年ないし五〇年生以降、構成樹種によっては葉量の減少があり、さらに、ヒノキが冠雪害などを受けて枯れ、そのあとにナラ・ブナなどの落葉広葉樹が生育したため、後年、落葉広葉樹の構成比率が増したことによる蒸発散量の減少があったことが考えられる。事実、同じ流出水量の測定資料を別途解析した結果、

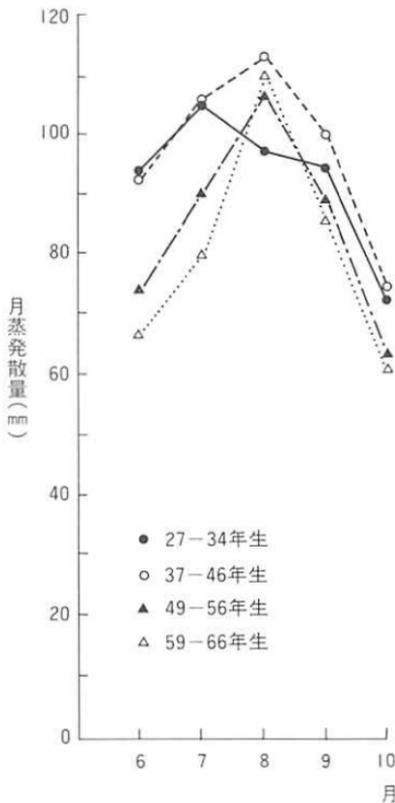


図7-3 針広混交林の高齢化に伴う月蒸発散量の減少(鈴木雅一 1985)

図7-3に示すとおり、高齢化とともに生育期各月の月蒸発散量が、盛夏の八月を除いて明らかに減少したことが知られた。

つぎに、落葉広葉樹林の蒸発散量が常緑針

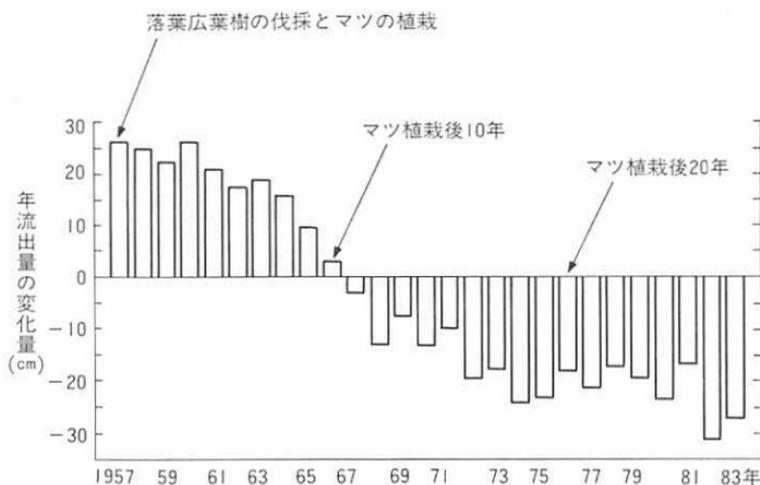


図7-4 林況の変化と年流出量の減少(アメリカ合衆国, W.T.Swankほか 1987)

葉樹林より少ないことを実証した研究成果を示す。アメリカ合衆国ノースカロライナ州の山地にある試験流域で、落葉広葉樹の混交林の常緑針葉樹林への転換に伴う流出水量の変化が調査された。図7-4に示すとおり、一九五七年に壮齢の落葉広葉樹林が皆伐され、ただちにマツが植栽されたものの、すべての伐採試験の結果と同様に、年蒸発散量が減少したため、年流出量が予測よりも大きくなった。そして、その増加量は植栽したマツの成長とともに年々減少したものの、年流出量が皆伐されなるときの予測流出量よりも大きくなった。そして、その増加量は植栽したマツの成長に伴う蒸発散量の増加とともに年々減少していき、一年後以降は増加量はなくなり、さらに年流出量そのものが皆伐されなるときの予測流出量よりはっきりと小さくなった。この

ように減少したのは、常緑針葉樹林、しかも成長が最も旺盛な青年期の森林の蒸発散量が多いこと、したがって落葉広葉樹林のそれが比較的少ないことを明らかに示している。

混交社会の構成要員

水保全に望ましい具体的樹種についていえば、個々の樹種に水保全面からみた特徴が認められることは事実である。まず、森林土壌の維持・改善にとって重要な根系についてみると、土壤条件などについての同じ比較条件下で、主たる根を垂直方向に張り、比較的深い土層にも根量のある深根性樹種と、主たる根を水平方向に張り、比較的深い土層には根量の少ない浅根性樹種がある。前者の代表的樹種は、針葉樹ではアカマツ・クロマツ・スギ・モミ・ヒメコマツなど、広葉樹ではコナラ・ミズナラ・クヌギ・ケヤキ・クリ・トチなどである。後者の代表的樹種は、針葉樹ではヒノキ・カラマツ・サワラ・ツガ・トウヒ・エゾマツ・ヒバなど、広葉樹ではブナ・シラカシ、ニセアカシア・ヤマハンノキなどである。同じ深根性・浅根性樹種といっても、根系の平面的張り方にも樹



スギ高齢林



スギ若齢林

種による個性がみられ、一般に樹冠の投影面積の倍数程度に張るとみられる。例えば浅根性樹種でかなり広いものや、深根性樹種で相対的には広くないもの、あるいは斜面の上下、水平のいずれかの方向により広く張るものなどがあり、これも土壌保持の面で無視できない。

土壌改良に重要な落葉などの有機物の供給能力についてみると、同じ比較条件下で樹種間に差が認められる。常緑針葉樹林は落葉樹林よりも多く、同じ常緑針葉樹林でもスギはマツやヒノキよりも多い。さらに、土壌改良に重要な土壌動物・微生物の生息についても、一般に針葉樹人工林は天然林より、若齢林は高齢林より、そして、構成樹種の単純な森林は複雑な森林より種類数も個体数も少ないといわれている。

一方、降水遮断についてみると、細かい葉が小枝に密に着生して、単位面積当たりの葉量が大きく小枝が密にまとまった樹冠をもつ針葉樹類は、これらより比較的大きい平滑な葉を疎に着生する広葉樹類より一般に遮断作用が盛んである。また、同じ樹種でも、当然ながら、林冠の疎開した幼齡林や高齡林より、生育旺盛な青年期・壮年期の森林で大きい。さらに細かくみれば、例えば、ブナなどの広葉樹のうっ閉した壯齡林では雨水の一時保留作用が大きく、また樹体構造の關係などで樹幹流下雨量が多いため、激しい降雨の林床への衝撃的直達を避け、降水を穏やかに林床に導くといった働きにも特徴がみられる。蒸散作用についても降水遮断とほぼ同様なことがいえる。

以上を総合すると、スギやブナなどは他に比べて一応水保全上すぐれた樹種と考えられるが、詳細に個々の特性についてみれば長所も短所も混じえており、すべての樹種についても同様なことが考えられる。結局、個々の特性について水保全に望ましい樹種があり、これを総合して相対的に優位な単独樹種を選定することはできるものの、絶対的な単独樹種はないといえよう。つまり、望ましい個別特性をもつ樹種の單純林ではなく、混交・複層林でそれぞれの個性が補強され合せて全体機能が高くなる。例えば、同じ比較条件下で森林土壌の粗孔隙量を調査したところ、カラマツ―ヒノキの二段林では、ヒノキの單純林より三〇ないし四五%多かったという調査報告があり、また、
[図7—5にみるとおり、同じ比較条件下で、ヒノキ―アカマツの二段林では、ヒノキ一斉林よりか

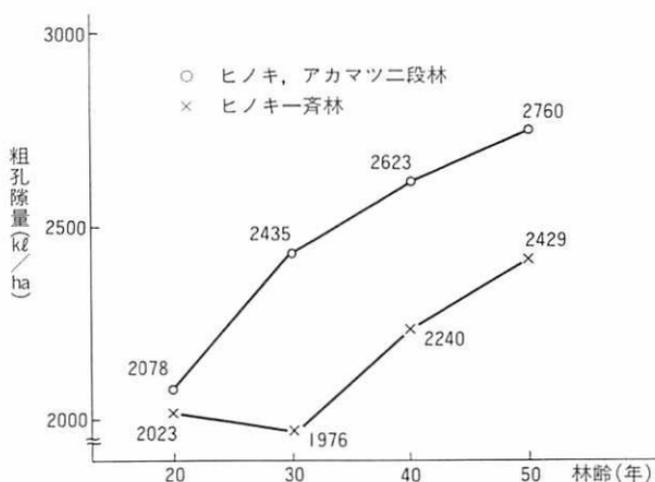


図7-5 森林土壌の粗孔隙量の比較

なり粗孔隙量が多いことなどが実証されている。しかし、前述のとおり、いずれの樹種も高齢になるにつれて土壌孔隙性や土壌保全性が向上し、樹種間の差は少なくなるといえる。

何よりも、健全で確実な生育を保持する森林でなければ、機能を発揮し得ない。したがって、当該地を本来適地とする複数の樹種の高齢木を中心とする混交・複層林で、地上部・地下部ともに充実し、活力ある生態系としての森林こそ、最も水保全機能が高い森林といえよう。

8 降水による災害と森林

人間の生存にとって不可欠の水も、その循環の中で多様な自然現象の原因となり、人間の自然とのつき合い方によっては、これらの現象が生活や生産活動を妨げ、ときには生存を脅やかすこととなる。その自然災害には洪水害・山崩れと土石流・地すべり・なだれなどがある。数多い自然災害のなかで、近年最も人命損失が多かったのは土石流を初めとする土砂災害である。

ところで、森林はこれら自然現象の発生場に存在して、これら現象の軽減もしくは防止に働き、人の生命・生活を支える機能をもっている。以下に、水による災害と森林の働きを概観してみよう。

洪水害

台風時の豪雨・集中豪雨・豪雪の急激な融解などによる大量の流水が、急勾配の溪流、河川を流

下するとき、流路の許容量を超えると、流水が運んできた土砂・石礫とともに溢れ出し、あるいは、溪岸・河岸堤防を破壊して流出し、周辺の財物を押し流したり破壊したりする。こうして農耕地や住宅団地、市街地に浸水して多大の被害を起こすこととなり、ときには不幸にも尊い人命を奪うことさえある。一般に洪水害といわれるものである。

近年は、河川の災害対策、すなわち防災ダム・堤防の整備が進んで、大河川の中・下流における氾濫洪水害の発生頻度は減少し、代わって、中・小河川の都市域において流域の浸透・遊水機能の劣化と資産の著増から、氾濫による浸水災害が増加している。また、大河川の上流域で、ときには



鉄砲水で切断された線路

大量の土砂が埋まった大型ダムの上流部で氾濫洪水が発生して、ダムの流量調節効果や管理のあり方などが批判をよんだりすることがある。さらに、上流の水源山地帯でも、各種の土地開発の進展による地域的浸透・遊水機能の低下などを理由として、溪流などで小規模ながら洪水害が発生することもある。

このような洪水害に対して、森林はつぎの



土砂の流入でしゅんせつが必要となった大正池

ような防止ないしは軽減の働きをする。

一つは、水源山地で、その流出平準化機能によって洪水流出を抑制する働きである。他の一つは、溪岸・河岸の林帯で堤防などの河川施設と協調して溪岸の浸食・破壊を防ぐとともに、氾濫時に農耕地や家屋などの流失と流入土砂による埋没などの被害を軽減ないし防止する働きである。

溪岸・河岸の林帯はどんなに密であつても、水そのものの溢流・氾濫を阻止することとは不可能である。しかし、激しい溢水の水勢を摩擦増加で減殺し、また、流送してきた土石をふるい分けて林帯内に抑留し、流入・堆積による被害を減じ、また溪岸そのものの崩れの防止にも寄与する働きがあ



土砂流出を防ぐ溪流えん堤

る。こうして、溪流沿いの洪水氾濫危険地域の財物被害を軽減し、ときには家屋などの倒壊・流失防止に、あるいは人命救助に大きな効果をもたらすこともある。強じんな根系をもつケヤキ・アカマツ・ナラ・クスノキなど、または密な竹林から成る水害防備保安林は、昔は治水体系の主要な存在であったが、河川改修工事の著しい進展に伴って、今では河川堤防上など河岸にある林帯は著しく減少し、現在水害防備保安林は全国に七四〇ヘクタールを残すのみとなった。しかし、山間地帯の溪流沿いで洪水害のおそれのある地域では、洪水害軽減のための緩衝林帯の整備・保持は、今日

でもなお意義深いものがある。

今後ますます重要度を増すのは、多雨で急峻な奥山の水源地帯での森林の流出平準化による洪水流出の抑制である。すなわち、水不足問題を誘発する異常少雨が頻発している近年、全国の主要河川のほとんどで築設されている多目的ダムの水資源保持機能の確度と効率を向上するため、その総貯水容量のうちの利水容量をできる限り大きく

することが求められており、これには総貯水容量のうちの洪水調節容量を当てる必要がある。しかし、洪水防止を軽視することはできないため、ダム湖への流入段階で洪水流量を減らし、そのぶん利水容量を増やすことが必要であり、これには森林の流出平準化機能の最高度の発揮が期待されている。ここにダムと森林の協調の重要性がある。

森林の流出平準化機能の最高度発揮は、同時に、低水流量の増加、安定化を進展させてダム湖の水資源保持機能の向上にも寄与することになる。また近年ますます重要な問題となってきたダム湖の流入土砂の堆積による貯水機能の低下の防止にもつながる。これは、従来から複雑な降水の降り方のために貯留・放流管理のむずかしさから、ときに水不足や洪水を避けられないとの批判があった流量調節管理の向上、いわばダムの負担の軽減にもつながることとなる。もちろん、ダムのない河川の洪水防止には、河川改修や水田地帯の効果などに先行して、水源地帯の森林の最高度の機能発揮に期待がかかっている。

山崩れ

山地に、異常に強いかまたは大量の雨が降ると、ときには山腹斜面が安定性を失い、多量の土砂・石礫や岩塊などが重力の作用によって斜面から下方へ突発的に激しく移動する自然現象、すなわち山崩れが起こる。この規模は面積にして数十平方メートルから数十ヘクタールまで、深さも数十センチメートルから数十メートルまでに及び、実に多様であるが、崩れる深さによって二つの型に区分される。

一つは表層型山崩れで、樹木の根が分布する深さ、もしくはそれよりやや深い程度の土層が、降水の浸透とその地中移動によって凝集力・粘着力などの力学的安定性を失い、地表に沿って剝落・滑落などの形で急激に崩れるものであり、これは降雨の強度や表面地形との関係が深い。溪岸斜面では、渓流水の衝撃力、あるいは流水による脚部の洗掘などで支えを失って、また、集水地形の山腹では、異常な地表流水の急激な表土浸食力によって、規模の大小はともかく同様な崩れが起こることがある。

他の一つは深層型山崩れで、基岩を含め樹根分布層とは無関係に深い地層の、造山運動で碎かれ

た層や温泉熱水その他で風化の進んだ層など力学的強度の弱い地層に起こる。これは地下水の増加などの異常水圧をきっかけに、地表形状とは無関係に急激に崩れるもので、大雨の総量や地質構造と関係が深く、一般に表層型山崩れより規模が大きい。

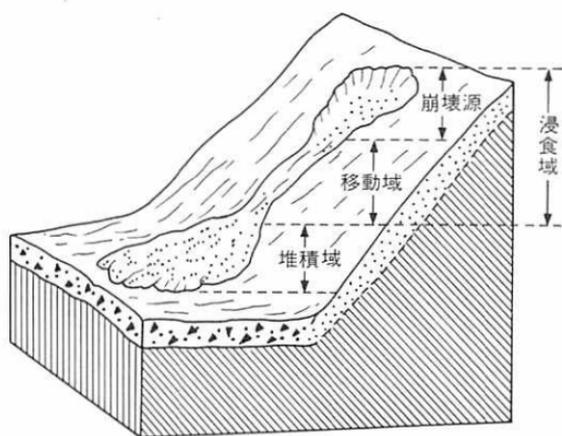


図8-1 山崩れの変動区域の区分

くずれた土地が本来有益な利用地であれば、崩れそのものが災害である。さらに、模式図(図8

—1)にみるように、崩された土砂・石礫や岩塊が一举に大量に移動する際、移動域の土地と、そこに資産があればそれらを破壊して押し出す。そして低所の緩斜地か平坦地に達して堆積し、その土地・資産を破壊・埋没するため、軽重の差はあれ、必ずなんらかの災害を引き起こすことになる。ときには家屋や交通機関の被災や人命の損失さえ伴うこともある。

このような山崩れ現象に、その場に生育する森林はいかに関係しているのだろうか。高齢の太木から成る立派な森林は、山腹の土層中に強じて弾力性・屈撓性に富む根系を、いわば丈夫な網を広げたように、また、大小

さまざまな杭を打つたように張っている。このことは、山腹斜面の土壌の崩れに対する抵抗力の増加にかかわっている。すなわち、ある厚さをもってからみ合い斜面方向に広がりをもって網のように張った根系は、土壌を緊縛し、土層内の摩擦抵抗を大きくして凝集力を強めており、根自身の切断抵抗力や摩擦抵抗力とともに重力による引張りへの抵抗力を増している。こうして豪雨で含水率の非常に高くなった土層のずれによる亀裂の発生防止に働き、このことが降水の異常な集中浸透の回避につながる。また、深さ方向に発達した根は、下層ほど硬い土層に杭を打つたように働き、これも土壌の重力による移動への抵抗力の強化をもたらす。前者を根系の網状作用、後者を杭作用とよぶ。

したがって、根系より深い地層、とくに構造的に弱点をもった基岩での崩れの防止には、森林の効果は直接的には及ばない。ただし、このような場合でも、弱点をもつ基岩の地帯の表層に良好な森林土壌があるときは、降水を偏りなく浸透・透水させるため、弱点への異常な集中透水が避けられたと考えられる事例がある。また深層型の大崩壊にもかかわらず、森林で緊縛されたままの大土塊の形で、ばらばらにならず移動したため、災害程度がいささか軽減された事例もある。このような点での効果は、深層型山崩れにも考えられよう。なお、森林が崩れ落ちる土砂を途中で抑止し、あるいは、その堆積体の二次的崩れを防止して、総体として災害の軽減に貢献する場合も多い。



表層型山くずれの復旧工事

立派な森林は有機物の供給などにより超長期にわたって、より深い土層を生成・保持し、かつ、土壌の構造を改善し、また、根系網を発達させて降水の浸透と土層中の水の動きを助長する。このことだけからは、土壌の不安定性を増すこともありうると思われる。しかし、異常な降雨と特別の土壌条件がいかぎり、その根系網による安定性との間に調和が崩れることはなく、一般に森林の表層型山崩れ防止効果は発揮される。このことは物理的にはまだ十分究明されていないが、森林地における表層型山崩れの発生頻度の統計的結果から、森林の効果が明らかに示されている。

しかし、降雨が異常で林地条件がきびしい場合に、立派な森林地でも表層型山崩れが発生し

た事例は皆無ではない。山崩れ現象は本来、降雨・地形・地質・土壌・植生などの諸条件の総合的なあり方に左右されるものであり、森林のあり方が唯一決定的なものではないことから避けられないものである。ただし、諸条件のうちで人為的な変更、したがって改善も悪化も可能な条件は唯一森林であり、この点で最も重要な条件といえよう。とくに浅根性樹種の過密不良林などにみられるように、弱い根系が浅くまとまって単純な板状層を成した森林では、豪雨による浸透水が根系の板状層とその下の土層との間に集中し、離層を生じて板状層の滑落を引き起こす。そのようなことが推定された場合は、浸透水の動きに関連して、森林のあり方に問題があると考えられる。

さらに、森林の大きな重量が山崩れの発生にかかわるとされることもあるが、その重量は崩壊土壌の重量の数%以下の程度である。また、豪雨に強風が伴った場合、林木の揺れや根倒れなどによる土層のゆるみが崩れの誘因となることが考えられる。これは一般に浅根性樹種の若い過密林や過老な森林における小規模現象であり、これらが重大な山崩れの誘発条件となった事例は少ない。

森林の林地保持効果は、適地適樹種の過老でない高齢木の適切な分布によって最善にもたらされる。なぜなら、樹種によって根の材質の強じんさや根系の深さ、張り方などには差があり、また、同じ樹種でも高齢なほど根量は多く、深さも深く、偏りのない分布が期待できるからである。

要するに、森林の根系は、本来、土壌の崩壊に対する抵抗力を増加しうる土層範囲内で起こる表

層型山崩れの防止に役立つ。また、激しい地表浸食をきっかけに起こる山崩れは、林木を初めとする地表植生、落葉・落枝などの雨滴衝撃、地表流水に対する保護効果によって防止される。簡単にいえば、根系の深さより浅い土層で発生する山崩れの防止に有効といえる。したがって、根系より深い地層で発生する山崩れ防止には寄与しないし、また、斜面の傾斜や降雨の強度が限度を超えた場合には、表層型の山崩れでも防止できない。現実には、森林の働きの及ばない大規模の深層型山崩れが大災害をもたらしやすいのに対して、表層型山崩れは一般に小規模で、個別の災害は大きくない。しかし表層型山崩れは発生頻度が高く、その崩落土砂の水系集中などを含め、地域的に総合された災害は重大となることも多いので、この点で森林の働きは大いに評価される。

広大な山地のすべての山崩れを、人為的に防止することなどは、技術的にも経済的にも不可能である。したがって、多面的に経済的・環境保全的效果の大きい森林の整備によって危険地域での山崩れ防止を図り、その効果の及ばない明らかな危険地に重点的に人工構造物対策を施すよう努めるのが妥当と考えられる。

土石流

山地に大雨が降り激しい流出が起ると、ときには急勾配の溪流で土石と水が一体となって流下する自然現象、いわゆる土石流が発生する。これは、大量の流水が砂礫を個々に流すいわゆる土砂流と異なり、かなりの巨石を混じえたさまざまな大きさの土砂・石礫と水の混合物が、流体となつて移動する現象である。

溪流に大量に堆積していた土砂・石礫が豪雨時の激しい流水と一体となり、または、豪雨時に谷頭などで起こった山崩れの土砂が、これを起こした中間流の噴出水と一体となる。ときには山崩れの土砂が溪流をせき止めて、いわば天然ダムを築いたのち、これが決壊して大量の土砂と水が合体し、渓床に以前から堆積していた土砂もまき込んで一体となる。あるいは地すべり土砂が地下水と一体となつたり、さらには、火山爆発による噴出物が積雪をとかした水や火口湖の水・雨水などと一体となつたりする。こうして、それらが激しく移動して土石流が発生するのである。

土石流が巨石を混じえるときは、巨石を先頭にして盛り上がった形態で、秒速数メートルないし数十メートルといった速さで、強い直進性を持ち、遮るものを破壊したり押しけたりして、小尾

根を乗り越え、溪床を深くえぐりとして流下する。溪床勾配が一〇度程度以下の緩やかさになると自然に停止し始め、大量の場合は周辺の緩斜地にも広がって土石が堆積する。

このような土石の移動は、規模が大きいときは凄じい衝撃力や大量の土石堆積によって、溪流にある施設、あるいは周辺の農林地や家屋、道路などを破壊し、埋没させる。ときには人命被害を含めて甚大な災害をもたらすことがある。

したがって、豪雨・地形・地質など、土石流発生条件のそろった山地周辺で、人の生活・生産活動が濃密となってきた今日、土石流の防止はきわめて緊要な課題であり、対策工事は避難対策をも含めて全国的に着実に進められている。そして、発生の場に森林が存在するときは、それがなんらかの形で関係をもつことは当然である。最も重要な関係は、発生頻度の高い表層型山崩れの防止などによって、土石流の主体をなす崩壊土石や溪床の不安定堆積土石の生成を防止する点である。これによって直接土石流発生の予防に貢献する。ところが、いったん発生した土石流が激しく流下する段階では、もちろん流下勢力の減殺には寄与できず、それに巻き込まれ、かえって流送物の増量・複雑化が問題となることがある。

しかし、勾配が緩やかになる溪流下部では、土石流の流下速度がある程度以下になり、しかも保護対象に接近した段階で、溪間の治山構造物との協調によってその抑止に森林を活用できる。その

範圍で流下および堆積による災害の範圍と激しきなどを軽減、もしくは防止することが考えられる。いわゆる土石流災害の緩衝林としての活用である。土石流の流入が考えられる渓流沿いの比較的緩傾斜にある森林は、林木の抵抗力によつて流動エネルギーを吸収・低減し、比較的安全、かつ効率的に抑止と堆積をもたらすからである。

地すべり

ある種の地質から成る山地に長雨や大雨、豪雪がもたらされると、大量の浸透水が地下のある深さの土層の含水量を増してぜい弱化させる。このため斜面の一部が比較的厚い土層のまま、かなりの面積で徐々に斜面下方へ移動する自然現象、いわゆる地すべりが起こる。前述した、広義での深層型山崩れのうち、移動形態などが異なるものとも考えられる。これは、比較的ゆるい傾斜地で、地中の比較的深い所に粘性土があり、これに地下水が作用してすべり面を形成し、その上の土塊が乱れ少なく、大きな面積で、一日何ミリメートルといった速度でゆっくり継続的に、もしくは再発

を繰り返して断続的に移動する現象である。したがって、特定の地質、あるいは地質構造の所で多く発生している。

このように地すべりは土地の特性に素因があり、雨水・融雪水の大量の浸透による地下水がしみ込んで、粘性土の含有水分量を多くして安定性を弱め、すべり面をつくるのが主たる誘発原因である。また浸透水による土塊全体の軟弱化や、土塊内の地下水位と水圧の増加で移動を助長させることもあり、降雨・融雪の強度や総量などと地すべりの発生・移動速度との関係は単純ではない。事実、地質や地質構造の特徴によっては、山崩れのように豪雨時に発生する場合もあり、また、長雨や長期の融雪によつて発生する場合もある。

なお、該当斜面のこのような現象が、土地開発行為、あるいはダム湖の貯水位の変動や渓流水による斜面脚部の浸食などによつて誘発されることもある。

山地といつても、緩傾斜で湧水利用に好都合なことから生活・生産活動の盛んな土地で起こりやすい地すべりによる被害は、その土地の破壊および地すべり土塊の移動・堆積による田畑や家屋その他の資産、鉄道・道路などの破壊・埋没などであり、ときには人命の損失もあつて甚大であることが多い。その防止は微妙な土地移動の抑制をも含めて、きわめて重要であり、対策工事は全国で着実に進められている。

しかし、一般に地すべりの防止には、森林の直接的働きは期待できない。なぜなら、地すべりはいわば深層型山崩れの一種で、一般に深い土塊の移動であるため、表層型山崩れのように根系による作用が期待できないからである。現に、地すべり等防止法により指定される地すべり防止区域における行為制限に、立木竹の伐採制限が含まれていないのは、地すべり防止に森林は無関係との見解がとられているからである。したがって、地すべり防止を目的とする保安林指定は行わない方針がとられている。ただし、土地条件のほぼ同じ所の深くて強じんな根系をもつ高齢なケヤキ樹林地では、地すべりが発生せず、浅根性のニセアカシアその他の樹林地で発生したという調査報告などもある。したがって地すべりにも、ときには浅層型のものが考えられ、森林の根系の作用を中心とする防止効果が皆無ではないといえる。

かつて、森林の降水遮断・蒸散作用により、地すべり発生の直接原因である地下水の抑制を期待し、この点で適切な森林のあり方が検討されたこともあった。しかし森林土壌の浸透・透水性の維持・改善を抑制し、一方、蒸発散による土壌水分消費を助長する森林の整備は、具体的には簡単ではなく、この面での森林の活用が具体化された事例はない。

地すべりは前述のように再発性が強いことを特徴としており、一般に、再発に対する予防対策を着実に実施する必要があると考えられる。そのためには、まず、地すべり地の範囲や危険性を特殊な地形

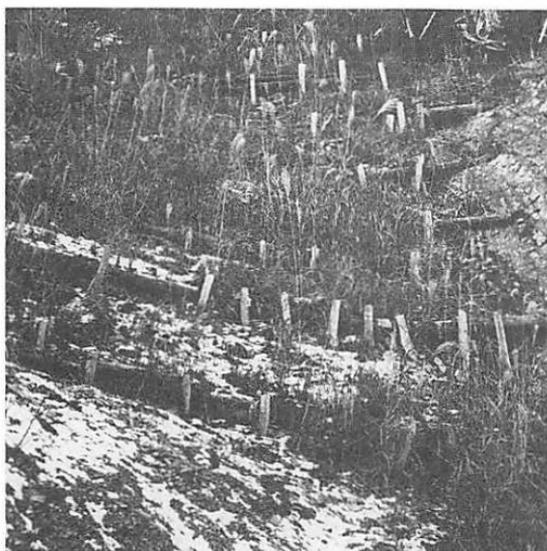
などからぬかりなく確認する必要がある。しかし、再発までの期間が長いときは、長期的な安定状態から危険性が見落とされるおそれがあり、確認が簡単でないことが多い。その際、現地に壮齢樹木が生立しているときは、これを判定の指標として利用することが考えられる。樹木の成長過程で地すべりによる土地の変動があったときは、その影響で樹幹が屈曲、あるいは特殊な傾斜をすることがあり、さらに、樹幹の材質に、重力に刺激された偏心成長による異常構造、すなわち、アテを形成していることがあるからである。これらを詳細に調べることは、過去における地すべりの時期・方向・範囲などを判定し、危険程度を判断する一資料となる。森林が地すべり災害の軽減にかかわるのはこれらの側面である。

なだれ

山地に大雪が降ったとき、急傾斜の山腹に積もった雪が、気温の急上昇その他のいろいろな理由で、比較的大規模に急激に崩れ落ちる自然現象、すなわちなだれが起こる。斜面上の積雪は、重力の作

用で常に下方に移動しようとしているが、積雪の底面と地表面との摩擦や積雪層内部の摩擦と支持力（ある部分を中心に考えたとき上部では重力による引張りに、側方では切り裂き、下部では押しつぶしに抵抗する力の総合による）によって安定している。何らかの原因で、重力による駆動力と摩擦や支持力の平衡が破れたとき、なだれが発生する。

したがって、発生は地表条件と積雪自身の条件によって支配される。前者では地形、とくに傾斜や地表のなめらかさが支配的で、三〇ないし五〇度の急斜面や、凹凸がなく、森林でないなめらかな草生状態などでは発生しやすい。後者に関しては、先に降った積雪面が硬化したのちに降った新雪は滑落しやすく、また、一時に大量に積もった新雪は支持力が弱く、風や動物の行動、あるいは雪庇せっぴの落下などの刺激で崩れやすい。また、気温の急上昇や春先の降雨が、支持力を低下させ、あるいは、積雪内部に特殊なもうい層をつくり、これの崩れをきっかけに発生することもある。いずれにせよ積雪状態もなだれ現象も、当然ながら気象条件に強く支配される。なだれには、発生の誘因その他によっていろいろな種類がある。すなわち、一点で発生して楔状くさびに広がる小規模型や、大面積で一斉に動き出す大規模型があり、積雪の表層部分が滑落する場合と全層が地表上を滑落する場合がある。点発生表層なだれまたは全層なだれ、面発生全層なだれなどと分類されている。さらに、含水量の多少などの雪質や形態を考えた七分類もある。



なだれ防止の階段工

点発生なだれは概して規模が小さいが、面発生なだれは大規模で、しかも秒速十ないし数十メートルもの速さで、途中で森林を破壊しながら滑り落ち、その衝撃力は大きい。全層なだれはときには表層土まで削り取って崩れ落ち、山麓など山腹下部にある家屋や道路などを破壊・埋没するうえ、人命を奪うこともあって、大災害をもたらすことが多い。したがって、山地における生活・生産活動の豊かになった近年、多雪地帯でのなだれ防止対策は重要さを増している。

なだれ災害防止対策には、なだれの発生を予防する方法として、積雪が危険状態に達する前に人工的に無災害のなだれを起こして、事前に危険積雪を除く方法や、地表に支持力を増強する階段工法・杭工法・柵工法などとともに、有力手段として、階段工などを組み合わせたなだれ防止林の造成・維持がある。一方、いったん発生したなだれの被害から保護対象を保護する方法として、堤防などによる誘導、被覆工など

による回避工法や杭・土塁などによるエネルギー減殺工法などがあり、現地の事情に適した方策が採用されて着実に施策が進められている。

各種対策の中で、森林の活用はきわめて重要である。下記のような機能に加え、恒続性や経済性に優れ、さらに、多面的効用の同時発揮が期待されるからである。すなわち、樹高や林木密度が一樣な壮齡林など望ましい森林は降雪の一部を遮断したうえで林内積雪の分布を均一化し、しかも、日射を抑制し、気温の変化や風速を制御することなどによって積雪の急速な変態を防いで安定度を高める一方、樹幹の抵抗力によって移動を阻止するので、なだれの発生を防止する効果はきわめて確実である。

樹種としては、壯齡時に樹幹が通直で材質が強じんであり、根系も強大なもので、階段工・杭工などの併行による新造成の幼齡時にも積雪の沈降圧や移動圧に対する抵抗性が強く、成長が早いものが望ましい。針葉樹ではスギ・モミ・ヒメコマツ・トウヒ・カラマツ・エゾマツ・トドマツなど、広葉樹ではケヤキ・ミズナラ・コナラ・ブナ・シナノキ・イタヤカエデ・ヤマハンノキなどのうち、当該地域を適地とするものとされている。

9 むすび

近年、何かにつけて「二十一世紀に向けて云々」と語られる。希望に満ちた二十一世紀を目指しての緊急の対処や、世紀の前進をきっかけに発展的転換を図ろうとする話題が多いからである。ところで、国や社会の来世紀へ向けての発展には、当然、基本的条件の整備が先行しなければならぬ。水資源の確保は、その重要な条件の一つと考えられる。

水は空気とともに人間の生命と生活活動に不可欠の物質であり、同時に、人間の経済・産業・文化などの諸活動を支える基本的資源であり、土地・森林などとともに国土を形成する根幹的天然資源であるからである。

わが国の水需要は経済・社会の発展や生活水準の向上に伴い着実に増加してきており、水資源の有限性と確保の重要性が強く認識されるようになった。

また、工業化・都市化の進展に伴い、自然との触れ合いが可能な潤いのある日常生活を求める国民の願望がしだいに強まってきており、なかでも水と緑の環境の整備と確保への関心はますます強くなってきている。そして、二十一世紀へ近づく年ごとに、水資源と水環境の画期的な保証への要

請が強まっている。

さて、将来の水需給について、西暦二〇〇〇年を目標とした国土庁の見通しはつぎのようである。まず、生活用水の全国的需要は、人口が一億三二二〇万に達するとの予測をベースに、高齢化社会の進展や価値観の多様化などに伴う生活水準のいつそうの向上による家庭用水の需要増加に加えて、都市化のより以上の進展に伴う公共社会施設の整備・充実などのほか、第三次産業の活発化などによる都市活動用水の需要が着実に増加を続けるものと見込んでいる。また、今後とも、工業活動はわが国の経済社会の発展の原動力として主たる役割を果たすため、回収・再利用率の高い工業用水の需要も着実に増加すると予測される。生活・工業用水の取水量は一九八三年の三〇七億立方メートルが、二〇〇〇年には四三〇億立方メートル程度になると見込まれている。さらに、農業用水の全国的需要は栽培技術の向上、水田の汎用田化、畑地かんがいや施設栽培・畜産経営の規模拡大などによる増加が見込まれる。具体的には一九八三年の五八五億立方メートルが、二〇〇〇年には六二六億立方メートル程度に達するものと見込まれている。結局、これらの用水の全国的総需要量は、一九八三年の八九二億立方メートルが二〇〇〇年には一〇五六億立方メートルに増加すると予測されている。

このような取水・使用水量の増加に加えて、陸地での循環過程にある水の存在自体が、生活環境



環境資源としても大切な清流

に与える無形の効用に対する要請も、今後ますます強まるものと予想される。すなわち、河川や水路・湖沼などの、緑とともに水がつくる潤いとやすらぎ感のある憩いの場としての水辺空間や親水という観点での身近な水環境を保全し、ときには、これらを創出するための環境用水の需要が二十一世紀に向けてますます増大するものと見込まれる。

また、クリーンな地域エネルギー源としての水のもつ位置のエネルギーへの需要や、克雪対策の一環としての消雪・流雪用水とよばれる水の需要、あるいは二百海里時代に対応する内水面養殖漁業用の水需要などが着実に増大するものと予想されている。

以上のとおり、二十一世紀に向けて、まず、取水による使用水量の増加が着実に進むと予測され、同時に、取水しないで野外の循環過程にある環境資源



親水環境をつくる豊かな川の流れ

としての水に対する需要も確実に伸びると見込まれている。しかも、重要なことは、いずれの用水も年間にわたって常に安定して取水でき、もしくは存在していなければならぬということである。

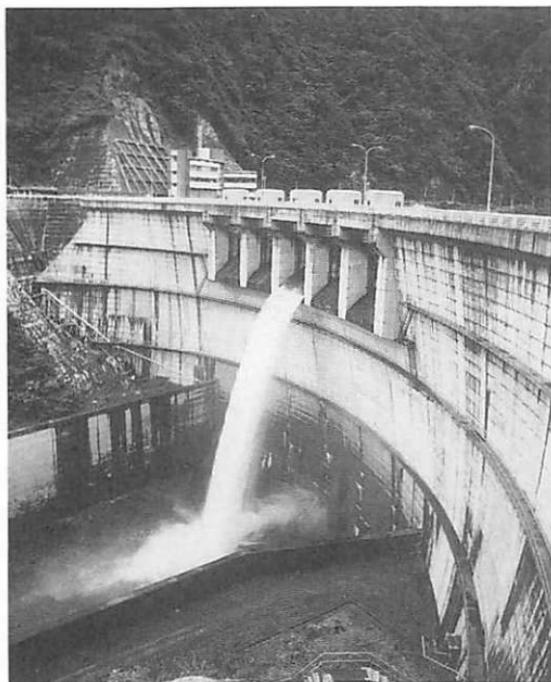
それにもまして見過せないことは、水量とともに水質の確保である。河川・地下水の汚染が懸念されがちな実情のなかで、おいしく、かつ健康的な水への要求はますます強まっている。また工業用水もバイオテクノロジー産業やIC産業などの先端技術産業によるとくに良質な水の需要が増しており、技術革新がいつそう進むとみられる二十一世紀に向けて、この傾向はますます強くなると予測される。

このような水の大量需要と、地域での多様な用途に対応できるのは、自然の循環経路の位置からやはり河川の流水である。一方、地盤沈下や塩水化その

他水質汚染の悩みを伴いがちな地下水の利用は、河川水の利用に転換を考えざるを得ない実情にあり、この面でも河川水利用はいっそう進むことになる。

さて、元来季節的・時間的偏りの著しい降水による河川流水の利用には、降水期の大流量の洪水を無駄に流さず、無降水期の渇水を防ぐなど時間的調節が必要となる。水資源開発とは、換言すれば流量の時間的調節にほかならないが、水資源開発といえは最近はその機能の明確なダムを活用が優先的に考えられている。ダムの重要性は重々認められるが、ダム湖による流量の調節にも、すでに触れたとおり、いろいろの問題があることを見逃せない。

まず、急峻で起伏の多い地形の、せまい国土を流下する急流河川にダムを造る場合、相当に高いダムでも貯水量はきわめて小さいのが普通である。そのうえ、水源山地はせい弱な地質や豪雨の頻度が高いなどのことから、流出水は多かれ少なかれ土砂を運んでおり、流れをせき止めるダム湖には、常に土砂が流入して堆積する。そのため、貯水容量の減少が日常的に進み、流量調節機能が低下するばかりか、ときにはすぐ上流での氾濫水害発生の原因になりかねないことが大きな問題となっている。地質、地形などの流域条件の地域差は大きいが、全国的に大ダム湖の総貯水容量の約六％強が、すでに失われている。個別には約二〇年で満砂したダム湖があり、堆砂率八〇％以上のダム湖が十指にも余る実情や、今後十数年で満砂すると推定されるダム湖があるなど、全国平均で



クリーンエネルギー源としても望まれる豊かな水

毎年貯水容量の約二％が堆砂によって減少していると推定されているのは重大なことである。また、大雨で、多様な微細粒子を含む著しい濁水が流入すると、濁水は滞留し、富栄養化による汚濁も加わって長期にわたって清く澄むことがない。濁水を放流することは、利水の障害となる。

これらの問題を解決するため、ダム湖保全の事業として、当面堆砂の排出や直上流での貯砂による土砂流入防止あるいは濁水の清澄化や、汚濁の少ない水層の選択取水による放流などの方法が研究され、実施も試みられてはいる。しかし技術的・経済的に満足なものは今後に期待されているようである。

ダム湖による流量調節は、降雨時・融雪時に河川に集まった水の短期的な調節であり、しかも降水量に対して貯水容量がきわめて小さい。例えば利根川上流の多くのダム湖の貯水容量は、

それらの流域の年降水量に対してわずか5%程度であるから、調節機能の主体である貯水・放流の操作にも問題がある。とくに、異常少雨の発生で、流入水量が過少になると機能は停止してしまい、また、予測される大洪水の調節に備えて、降雨前にかんりの洪水調節容量を確保するために放流すると、当面の利水に不利となる。しかも、豪雨予測が外れたときは水不足に拍車がかかりかねないこととなる。このため、近年時期的に偏りの著しい降水流出をもつと長期的に調節するため、石油備蓄のように水を備蓄する渇水対策ダム建設の必要が唱えられている。

さらに、異常少雨時などの利水に備えるため、常時の放流が少なく、中・下流の平常時流量の減少が著しくなると、河川の自然環境、したがって水辺のいわゆる親水環境の形成、魚類生息の場、水質浄化など流水の正常な多面的機能を破壊するおそれが強くなる。そこで流水維持のための放流に努力が払われているが、利水のための貯留との調整は簡単でないことが多い。このほか異常な断続豪雨の際の調節放流にもかなりむずかしい面があり、ときには下流での完全な水害防止を果たしたい事態も生じる。

以上のような多様なダム問題の解決には、すでに述べたように森林の降水流出平準化機能を初め、土砂流出防止・水質浄化機能の最高度の發揮による協調が必須で、しかも有効である。すなわち、ダム湖上流域の森林を徹底的に、前述の望ましいそれに整備し、適正に取り扱えば、これら諸機能

を最高度に發揮させ、ダムの悩みの解決に向けて役立たせることができる。そのうえ、水の循環過程への人為的要因を少しでも減らして、できる限りそれを自然にもどすことになれば、ダム下流の安全で潤いのある水辺環境の形成・維持はもちろん、取水利用の向上をいつそう進めうることとなる。

要するに、全国的平均年降水量を上回る雨量があり、降雨強度の強い高標高の急峻な水源奥地のすべてに、適地適樹種による混交・複層の高齢林を徹底的に整備する。また同水系の水源下流域部では、降水量は相対的に少ないが、緩傾斜で本来良好な土壌の深い地区の多いことなどの土地条件を考慮して、適切な森林を整備する。こうすることによって、全水源域で同時に多面的効用を發揮させ、ダムのあるときはその機能と協調させることにより、年間を通して清らかで変動の少ない川の流れを楽しみ、利用できるものになるものと期待される。

希望に満ちた二十一世紀に向けての水と緑の協調への努力が心の底から望まれるのである。

用
語
解
說

うっ閉——おもに森林に対して用いられる用語で、樹冠（樹木の枝葉が着生している部分）が相互に

接して林冠をつくり空間がない状態。降水遮断量に関係する。

雨滴浸食——落下する雨滴の衝撃によって地表面の土壌・岩屑粒子が飛散して起こる浸食。

雨量——雨・霧雨として降った水量を指すが、降水量と同義で使われることも多い。水高（ミリメートル）で表す。

河岸浸食——河川の両岸に対する流水の浸食作用。側方浸食ともいう。

河況係数——川の一年のうちの最大流量と最小流量の比またはその逆数。これが一に近いと河況が良好な川ということになる。

渴水位——一年のうちで三五五日は、これを下がらない川の水位。

渴水流出量——一年間の日流量を大きさの順に並べたとき、小さいほうから五〇日間の総流出量。

渴水量——一年を通じて三五五日間はこの下がらない程度の河川流量（水位）。渴水量は無降雨が長期間続いてもかかれることのない流量で、主として地下水流出でまかなわれている。

環孔材——樹木の横断面において、道管が成長輪（年輪）とほぼ平行の列状に並び、比較的大きいものが成長輪中の内部すなわち早材（春材）側にいわゆる孔圏を形づくっている材。なお環孔材でもその晩材（秋材）部の道管分布型には種々ある。

間伐

ほぼ同齡林木から成る森林で林冠がうっ閉してから、主伐（木材生産を目的とする最終的な伐採）を始めるまでの間に、林冠のうっ閉を適当に調節し、生産の目標に合うように立木の密度を調整するために行う伐採であるが、林木の一部を利用するために行う伐採を間伐とよぶこともあり、これに対して普通の間伐を保育間伐とよぶこともある。

基底流量

流域内に降水として供給された水のうち、地下水として流域内に比較的長い期間貯留されたのち、徐々に河川に流出する水の量を基底流量、あるいは基底流出量という。

洪水

大雨、融雪などによる河川や湖の異常な増水、または氾濫のこと。

降水量

雨・雪・霧・霰・雹などとして大気中から地表面に落下した水の量。時間を定め、その間に降った水がそのまま地表面にたまったと仮定した際の水深をミリメートル単位で表す。

混交林

二種類以上の樹種からなる森林で、単純林に対するものである。ただし、林業に関係のない下木の類は考えにいけない。また、数種類の林木からなる森林でも、その大部分が一樹種であるときは、単純林として取り扱う。混交林は性質の異なった樹種、例えば針葉樹と広葉樹、陰樹と陽樹、浅根性の樹種と深根性の樹種などが適当に配置されることによって、林地の生産力を十分に活用することができ、林木相互の競争が柔らげられるので、林木が健全に育ち、木材の生産量も多いと主張されている。害虫・菌類・暴風・山火事などに強

い樹種が混ざることによって、これらの害が発生しても急激に広がるのが防げ、天敵の繁殖にも好適であり、諸害に対する抵抗性も強い。

散孔材

— 道管の管孔が一成長輪を通じてほぼ均等に分布し、管孔の大きさもおおむね一樣な材。管孔が局部的には群をなしていても全体として一樣に分布していれば散孔材に属する。

自由水

— 土壌粒子表面の吸着力の影響外にあって、土粒子に吸着されていない土壌水をすべて自由水という。自由地下水を意味することもある。

蒸散量

— 植物が根から吸収した水を葉面から水蒸気として放出する水分の量。

蒸発

— 液体あるいは固体の表面で物質が気化する現象。このうち、固体から気化する場合は、とくに昇華とよばれる。水文学では、海洋・湖沼・河川などの水面や土壌面において水が気化することを蒸発とよぶ。

蒸発散量

— 植物の蒸散作用により大気中に放出される水分も含めて、陸地表面から大気中に放出される水の量。

蒸発量

— 地表、水面などから蒸発する水量。降水量と同様に一定時間当たり蒸発した水高（ミリメートル単位）で表す。

浸出

— 地下水が帯水層から地表に出て河川に水を補給すること。しかし、固形廃棄物を地下に埋

めたり、野積みにしたりしたとき、それに浸透した雨水や融雪水が廃棄物中の可溶成分を溶かして出てくる現象にかぎって用いるとする説もある。

浸食

雨水・流水・地下水・氷河・風・波・海流・潮汐・その他の可動性営力（浸食営力）が、地表の土壤や岩屑を奪い去る現象およびその働き（作用）。

浸透

地表面を通過して土壤中へ水が侵入していくこと。土壤中を水が移動することは透水という。水の循環過程で起こる諸現象に及ぼす森林や原野の影響に関する科学。

森林土壌

森林植生の成立を可能にしている土壤であり、同時に、森林植生の影響によって特徴づけられた土壤である。したがって砂漠土壤・草原土壤など植生景観によって特徴づけられた土壤と対比されるが、一般には、水田土壤、畑地土壤など人為によって土壤の性質を変え、栽培植物を植えた土壤と対比している。

森林土壤の最も大きな特徴は、その生成に関与する生物的因子が森林であることであつて、その有機物の供給の主体は樹木の落葉である。さらに樹木の根の作用と森林特有の土壤微生物・小動物の作用を無視することができない。

森林は亜寒帯針葉樹林・温帯落葉広葉樹林・熱帯多雨林などきわめて多種多様であるので、これらの森林の土壤にも多くの種類がみられる。したがって森林の土壤生成に及ぼす

影響も同一ではない。

森林理水

—— 河川流量の調整を理水という。理水は洪水と渇水の緩和、ある期間の流量の一様性の向上を目標とする。森林は水源山地で地上に達した降水が流路に出る、いわゆる流出の段階で河川の流量を調節するが、この機能を利用することを森林理水という。

水文学

—— 地球上の水循環を研究する学問分野で、地球上の水のありかた、循環、分布、およびその物理的ならびに化学的特性、さらに物理的ならびに生物的環境と水との相互関係を取り扱う科学。

水文学のおもな研究対象は降水、氷雪、蒸発散、地表水、土壤水、地下水、浸食と堆積、水質、水資源システムで、広義には水法も含まれる。応用部門には農業水文学・森林水文学・都市水文学・河川水文学・湖沼水文学・湿地水文学・地下水文学・氷河水文学などがある。

団粒構造

—— 土壤粒子が結合してできた多孔質の集合体を団粒といい、団粒が立体的に配列してできた自然の土壤構造を団粒構造という。大きささまさまの孔隙に富み、保水性や空気・水の透過性がよく、土壤微生物の活動を盛んにし、土壤浸食に対する抵抗性も大きい。

チロース

—— 道管が通導機能を失ってくると、道管に接している柔細胞が壁孔を突き破って道管内にふ

くれ出る。これがチロースで、發達して道管を閉鎖する。

低水位——一年のうちで二七五日は、これを下らない水位。

低水流出力——一年間の日流量を大きさの順に並べたとき、小さいほうから五一〜一三五日めの間の総流

出力をいう。

低水量——一年間の日流量を大きさの順に並べたとき、大きいほうから二七五番めに当たる日流量。

一年のうち、それより流量の少ない日が九〇日ある。

同位体——原子にはその中心部に原子核を形づくる陽子と中性子があり、それぞれの数に応じて核種

として区別される。各核種はその陽子数ごとに元素としてまとめられるので、同位元素には中性子の数が異なる数々十数種の核種がある。この核種の異なる同一元素を互いに同位体または同位元素とよぶ。

透水——いろいろな空隙（地層や土壌中のすき間など）における水の動きをいう。一般に水を通し

やすい性質を透水性という。

日降水量——降水の一日間の総量をいう。一日のうちに降水のない時間があつても連続する二四時間の

総降水量をとる。一日の境界（日界）はふつう二四時（午前〇時）とするが、便宜的に九時または一〇時あるいは一二時にとることがある。たとえば当日九時から翌日九時までの

総降水量を当日の日降水量（日雨量）とすることがある。

日平均流量—— 河川などの一秒間の流量。一日（任意の二四時間）の総流出量を一日の秒数で割ったもの。

単位は立方メートル／秒。

日流出量—— 河川のある断面を一日に流れる全水量（断面積×流速（メートル／秒）×時間）をいう。

年降水量—— 一年間の降水の総量をいう。通常ミリメートル単位で表すが、流域全体あるいは国土全体

の水資源量として表す場合は立方メートル、トンなどを使う。

破碎帯—— 破碎された岩層が帯状に分布している所。小破碎帯は、火成岩の貫入、ソルトドームの隆

起などに伴って形成されることもあるが、大規模な破碎帯は、断層の変位によって生ずる

ことが多い。破碎帯の幅は、断層変位の規模によって異なる。破碎帯には圧砕岩・断層角

礫・断層粘土などが発達することが多い。

ピーク流量—— 洪水時の最大流量で、計画高水位に対応する流量を指す。

比流量—— ある河川の流量観測地点における流量を、その地点より上流の流域面積で除した値をいい、

立方メートル／秒・平方キロメートルの単位で表す。比流量は流域面積の異なる河川の流

量を比較する場合などに用いられ、流域の地質・地形・植生などの諸条件をよく反映する

といわれている。

複層林——人工更新により造成され、樹齡、樹高の異なる樹木により構成された人工林の総称。一斉

に植栽され、樹齡、樹高がほぼ同じ森林に対する語。一部の樹木を伐採しその跡地に造林を行うことの繰返しにより造成される。

保安林

——水源のかん養、土砂の流失その他災害の防備・レクリエーションの場の提供など特定の公共目的を達成するため、森林法に基づいて一定の制限（立木竹の伐採、土地の形質の変更などの制限、植栽の義務）が課せられている森林をいう。保安林は、その指定の目的により次の一七種類がある。

水源かん養保安林、土砂流出防備保安林、土砂崩壊防備保安林、飛砂防備保安林、防風保安林、水害防備保安林、潮害防備保安林、干害防備保安林、防雪保安林、防霧保安林、なだれ防止保安林、落石防止保安林、防火保安林、魚つき保安林、航行目標保安林、保健保安林、風致保安林。

流域——ある川に流入する降水（雨・雪など）の降下する全地域。排水区域あるいは集水地域ともいう。

流量——とくにことわらないかぎり河川の流量をさし、川の流れの方向に直交する断面を単位時間（秒）に通過する水の量（立方メートル）。

林冠

樹冠が隣接する樹木の樹冠と接してすき間なく連続している状態。このような状態を閉鎖

またはうっ閉という。

林床

森林内の地表面。土層の最上層であるA₀層（堆積有機物層）をいう。

用語解説引用・参考文献

- | | | |
|--------------|------------|----------|
| 気候学・気象学辞典 | 吉野 正敏ほか編 | 二宮書店 |
| 新版 林業百科事典 | 日本林業技術協会編 | 丸善 |
| 森林水文学用語 | 野口 陽一 | 水利科学研究所 |
| 生態学辞典(増補改訂版) | 沼田 真編 | 築地書館 |
| 地下水学用語辞典 | 山本 莊毅編 | 古今書院 |
| 地形学辞典 | 町田 貞ほか編 | 二宮書店 |
| 地理学辞典 | 日本地誌研究所編 | 二宮書店 |
| 木材辞典 | 京都大学木材研究所編 | 創元社 |
| 木材の構造 | 佐伯 浩 | 日本林業技術協会 |

著者略歴

中野秀章(なかのひでのり) (第一・二・三・六・七・八・九章執筆)

昭和二十一年 九州大学農学部林学科卒業

同 年 農林省林業試験場勤務

元・農林水産省林業試験場防災部長・信州大学農学部森林工学科教授
農学博士

有光一登(ありみつかずと) (第四章執筆)

昭和三十四年 京都大学農学部林学科卒業

同 年 農林省林業試験場勤務

平成四年 農林水産省森林総合研究所森林環境部長

現 在 高知大学農学部教授・農学博士

森川靖(もりかわ やし) (第五章執筆)

昭和四十二年 東京農工大学農学部植物防疫学科卒業

昭和四十八年 東京大学大学院卒業

同 年 農林省林業試験場勤務

平成三年 農林水産省森林総合研究所森林環境部植物生態科長

現 在 早稲田大学人間科学部教授・農学博士

森と水のサイエンス

平成元年二月二十八日 初版発行

編集・発行——社団法人 日本林業技術協会

〒一〇二 東京都千代田区六番町七

電話 〇三・二六・一五二八一(代)

振替 東京三・六〇四四八

印刷・製本——東京書籍印刷株式会社

会員用

