

特集 記事

防災・減災に植生の機能をどう 生かすか

編集委員会

企画・総括 松村 伸二*

編集担当 勝見 武**・高野 伸栄***・堤 大三****・山本 晴彦*****

はじめに

松村 伸二*

防風林、防潮林などの植生帯は先人の知恵により災害の軽減に古くから利用されてきており、より身近には屋敷林・屋敷森というような生活環境を守り、同時に農林業生産とも結びついた樹林帯が存在していた。しかし、それら植生帯も近年の生活様式の変化や土地開発などにより、衰退の危機に瀕するものも多くなってきている。そのような状況にあって、1997年河川法の改正により「河川環境の整備と保全」が、1999年海岸法の改正により「海岸環境の整備と保全」が、2000年港湾法の改正においては「環境の保全に配慮」がそれぞれの目的に追加され、国の施策の多くに「環境保全」という言葉が盛り込まれるようになってきた。また農林分野においても1999年の食料・農業・農村基本法および2001年の森林・林業基本法の成立により「自然環境保全」が農業や森林の多面的機能の一つとして明確化されるに至った。古来からの防災植生が風化しつつあるのに反して、環境政策としての植生の活用推進は、もはや時代の趨勢となってきた。記憶に新しい2004年のスマトラ沖地震による津波災害においても、海岸林による減災効果が一躍脚光をあび、防災施策において

も植生が益々注目されるようになってきた。

植生は単に景観やアメニティとしての機能だけでなく、防災・減災機能を潜在的に持ち合わせているという認識については、国民の環境への関心の高さのわりには広く一般に理解されているとは言い難い。最近の環境配慮型の防災施策にはこの機能を有効に生かすことが効果的であり、環境にやさしく、かつ防災力を維持・増大するという二つの面の両立を植生活用に期待できるものと考えられる。しかしまた一方で、植生の存在が減災ではなく、場合によっては被害の拡大化につながるの見方も少なくない。

そこで、本特集ではそういった議論も踏まえて、海から、都市、川を経て山に至るまでの現在防災上注目されている植生の機能に焦点をあててみた。いずれの話題も単独で特集になりうる内容のものであるため、全体としてまとまりに欠ける感もあるが、幅広く読者に紹介する意図をご理解いただき、ご容赦願いたい。

植生を防災に生かすためには、それぞれの現場において適切かつ適正な活用方法があり、植生で満たせば環境保全であるというような独善的な捉え方では、先述したように減災ではなく災害拡大の恐れがあることも本特集で指摘されている。また、今なお植生の防災への活用には様々な問題

* 香川大学農学部

** 京都大学大学院地球環境学堂

*** 北海道大学大学院工学研究科

**** 京都大学防災研究所

***** 山口大学農学部

点があることや未だ解明されない領域が多く残されていることも述べられており、施策、研究の両面において今後解決すべき課題は尽きない。

2005年環境省から提出された環境省防災業務計画では「環境保全の観点に立った災害に強い国づくり、街づくりの具体的提案」を掲げ、地域防災計画作成の基準となるべき事項として「防災まちづくり等において環境保全への配慮を行うこと」を明記している。防災施策における植生の利用は不可避なものとして認識されつつある現在、既存の防災植生帯を含めた植生の活用が今後多方面で活発に推進されるものと期待される。本特集がその一助となれば幸いである。

1. 海岸植生帯の津波防災への機能 —減災か被害拡大か

今村 文彦, 柳澤 英明*

1.1 はじめに

今後、自然本来が持つ機能を利用しながら、地域の防災力を向上させる工夫が益々必要であるが、これらは、先人が実施してきた災害文化などに見いだすことが出来る。自然力を制御するのではなく、共存するという姿勢から生まれた対策は、現在においても有効であるはずである。津波対策においては、我が国の各地には沿岸の防潮林が代表格として挙げられる。長年の先人の努力により带状の広大な砂防林が整備されている。

また、昨年のインド洋大津波の大災害を受けて、熱帯・亜熱帯地域でのマングローブの機能が注目されている。マングローブは高密度な支柱根システムを持ち、幅のあるマングローブ林は、従来より高波などの短周期波に対して減衰効果が特に大きいことが知られている(松田ら, 1992)。ただし、津波のような長周期で非定常(過渡波)な波動に対する効果が十分明らかにされていない。また、養殖場の整備や沿岸開発などのために伐採が多く見られるのも現状である(近田, 2000)。本文は、今村・柳澤ら(2005)の結果を基に、我が国の歴史やインド洋大津波の被害例を見ながら、

マングローブを含む植生帯の津波災害に対する総合的な効果を紹介し、同時に限界を把握しながら、今後の利用・整備について議論をしたい。ここでは、防潮林などの樹木、マングローブなどを総称して沿岸での植生帯と呼びたい。

1.2 植生帯の効果

植生帯は、green belt さらにはgreen barrier と呼ばれるように、沿岸をラインで守ることが出来る透過性の抵抗帯である。従って、津波の浸水は許すが、エネルギーを低下でき背後地での被害の軽減に役立つと言われる。人工構造物と違って、建設費用やメンテナンス費用は小さく、継続的に機能の維持が期待できる。

まず、過去の津波災害の事例から、防潮林を代表とした植生帯の効果を整理した(首藤, 1985; 原田, 2003; 今村・柳澤, 2005)。大きな効果としては、以下の4例が挙げられる(図1-1参照, 原田, 2003)。それぞれ例を引用しながら説明したい。

- 1) 背後地への津波の低減効果
- 2) 漂流物の内陸への侵入阻止
- 3) 海域への流出阻止(人命救助)
- 4) 砂丘の形成・維持

(1) 背後地への津波の低減効果—スリランカ沿岸での事例

平成16(2004)年12月26日午前8時頃(現地時間)に発生したスマトラ北西部沖地震(M9.0)は、ユーラシアプレートとインド・オーストラリアプレートの境界でのプレート間地震であり、余震観測から震源域は約千キロメートルにも達し、この

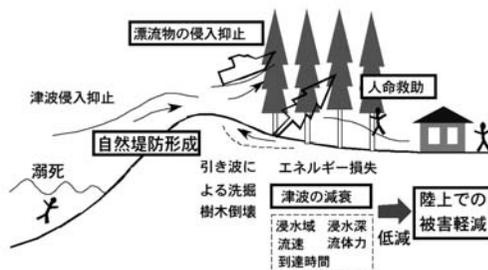


図1-1 防潮林による津波減災効果

* 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

地域でも最大級の規模となった。地震より生じた津波は、直後にインドネシア沿岸を襲い、その後、タイ、マレーシア、バングラディッシュ、さらにはインド東岸、スリランカ（波源から1,600km）にも達した。驚くべき事に、アフリカ（波源から約6,000km）および南極へも来襲した。このようなインド洋全域に影響した津波は初めてである。

スリランカ南西部のコロンボからゴールまでの平均高さは、5 m 程度であったが、9-10mにも達した地点もあり、建物、植生や地形の影響を受けて、局所的な津波の増幅が見られた。この沿岸では、2-3mの標高を持つ平坦地形が続いており、遡上してくる津波が斜面を駆け上がって大きくなる様子はない。沖合からほぼ3-5m程度の津波が来襲し、海面が上昇し、陸域へ流れ込み、そのまま内陸へ流入していったものと思われる。カハワのような地形は、海岸域で標高が高く、内陸に行くにつれて若干低下する傾斜がある。このような地域では、建物のほとんどは全壊している。しかし、写真1-1にあるように、津波が2階の窓まで到達したにもかかわらず、この建物はガラスも破壊されておらず無傷である。詳細な検討はこれからであるが、建物背後にある植生が大きな役割を果たしたものと考えられる。

(2) 漂流物の内陸への侵入阻止

昭和58 (1983) 年5月26日正午、秋田県北部から青森に広がる100-120kmの範囲を震源域として日

本海では当時最大規模のM7.7の地震により津波が発生した。秋田県峰浜村青の汀線から40mの所にあった浜小屋は津波により押し流され、100m後方の防潮林に引っかかっていた。このあたりで津波の高さは最大12.6mであった(石川ら, 1983b)。津波の流体力は重さ4 tonの消波ブロックを押し流し砂浜に打ち上げさせていた。このような巨大な津波の流体力により沿岸にある様々な物が津波とともに漂流物として陸上を襲うが、防潮林により漂流物が内陸へ侵入するのを防いでいる。これにより、漂流物が内陸へ侵入し家屋や構造物へ衝突することによる二次被害を防いだことになる。

写真1-2は、スリランカ南西海岸ヒッカドア付近での写真であり、ココナツの木により、漁船の浸入が防がれている事が分かる。近くの漁港または周辺に停泊していた多くの漁船は、津波の来襲により、転覆または陸上へ打ち上げられていた。沿岸でのココナツの木は、これらの浸入を見事に防いでいる。幹線道路が沿岸沿いにあり、漁船が打ち上げられたとすると、交通障害が生じていた。写真1-3は、タイ南西部パンガー県ナムケム付近での写真であり、マングローブ林により、漁船がせき止められている。近くの漁港または周辺に停泊していた多くの漁船は、津波の来襲により、転覆または陸上へ打ち上げられていた。沿岸でのマングローブ林は、これらの内陸への侵入を止める効果がある。



写真1-1 スリランカ・カハワでの破壊を免れた建物



写真1-2 スリランカ・南西海岸ヒッカドア付近

(3) 海域への流出阻止

明治29(1896)年6月15日(旧暦端午の節句)夜、三陸沖合で地震が発生し、沿岸で報告された震度は2-3程度であり、揺れによる被害はなかった。過去津波被害を繰り返し経験した住民も、微弱な揺れの後に津波の警戒心はなかった。しかし、これに伴う巨大な津波が20-30分後に沿岸各地を襲った。最高遡上高さが38m(大船渡市三陸町)を記録し、2万2千名以上の犠牲を出す大災害が発生した。当時の被災状況は、風俗画報という当時の生活や災害を絵図で報告した我が国最初のグラフ雑誌に掲載されている。写真1-4はその中の1枚であり、住民は、家財や家屋と共に流されていることがわかる。これは津波引き波の時の様子であり、多くが沖合の彼方へ運び去られている。ただし、絵中にあるように、松に引き掛かる女性が見られる。このように海岸の防潮林により命が助かった人々は少なくない。「人助けの松」は、地元の人に今も語り継がれている。

また、インド洋大津波では、アンダマン・ニコバル諸島で、津波の直撃を受けながら木にしがみつき難を逃れ、その後10日間生きていた少年(14)が無事救助された。食べ物が無いことはもちろん「水を飲んだのは、(津波に巻き込まれた際に飲んだ)海水だけ」という状況で、体重が5キロ減っていた。このように、植生帯の上に逃げ、多くの人命が助かっている。



写真1-3 タイ・ナムケムのマングローブ林に止められた漁船(The Nation Phuket Gazetteより)

(4) 砂丘の形成・維持

沿岸域に存在する砂丘は、自然の防波堤として津波低減に効果がある。これらを形成し維持する役割が植生にある。例えば、日本海側の飛砂の影響を受けるような地域においては、防潮林は防砂林の役割も果たすことになるため、海側に地盤の高い砂丘を形成することが多い。石川ら(1983)によると秋田県峰浜村青山の砂丘の一部は幅10m、高さ2mにわたりガリ状に浸食され津波が流入していた。浸食は飛砂防止のために植栽されていたハマニンニクが刈り取られた部分で生じており、ハマニンニクが津波の浸食防止にも役立ち、砂丘の自然堤防の役割を補助していたと考えられる。また、秋田県能代市西山下では作業道に沿って第1砂丘が浸食された。さらに、砂丘の高さが低いために林内に海水が流入している箇所があり、砂丘の高低差による津波越流を阻止する機能の違いが確認できる。

ただし、多くの海岸で砂丘による津波の侵入を阻止した事例により砂丘が自然堤防として津波減災機能を持つことが報告されているが、上に述べたように浸食に弱い箇所や海岸に通じる作業道や砂丘の高低差により津波の侵入する箇所があり、自然堤防としての機能を低下させている。

1.3 植生帯への被害と被害拡大の要素

首藤(1985)は防潮林が津波に対して被害を拡大させるよう働くこともあると指摘している。実際、来襲する津波規模が大きい場合には、多くの植生



写真1-4 明治29年三陸大津波での被害状況(宮城県唐桑村、風俗画報より)

が倒されたり、流出している。巨大津波に対しては防潮林を構成する樹木自体が破壊され、防潮林は津波減災機能を果たさなくなり、樹木自体が漂流物となり家屋や構造物への衝突による二次被害を引き起こす可能性を持つ。このように、防潮林の津波減災機能を利用するためには防潮林自体が破壊される限界についても理解が必要である。

タイ・カオラックでは、植生基礎の侵食が多く確認された。ここでは倒壊を免れているが、基礎部分が流出することにより根が出現し維持できなくなる。一部の背高樹木は、流出し内陸へ持ち去られていた。写真1-5は、インドネシア・バンダアチェ市内沿岸部での様子であり、大量の流木が生じていることが分かる。一部には、沿岸の土砂もとも流出し、地形が大きく変化していた。これらは、市内中心部にまで流され、被害の拡大を誘因していると考えられる。

一般に、植生の中でも樹木の倒伏には、剪断破壊、曲げ破壊、根付け根の掘削、引き抜きなどがある。主に現地観測から、津波による植生帯の倒木形態は以下の5つに分類されることが示されている(図1-2参照、柳澤ら、2005)。



写真1-5 インドネシア・バンダアチェでの大量の流木

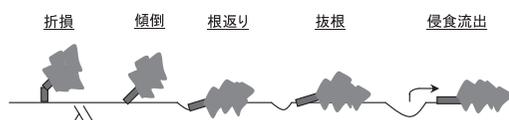


図1-2 津波による植生帯の倒木形態

- (1) **折損**：幹部付近で折れたもの。剪断や曲げ破壊により生じ、津波の衝撃が強い海岸・河口付近で多くみられる。
- (2) **傾倒**：根が抜けずに地面についたまま傾いたもの。主に幹が細く、密度の高い植生帯で見られる。傾倒の場合、樹木が枯れずそのまま生き続ける場合もある。
- (3) **根返り**：根がむき出しになり、その場で倒れたもの。ほぼ、そのまま枯れてしまう。
- (4) **抜根**：根が完全に抜けてしまい流出したもの。漂流物となる危険性がある。
- (5) **侵食流去**：地盤が侵食され支持力を失い流出したもの。漂流物となる危険性がある。

1.4 おわりに

いままで植生帯の減災機能と逆に被害拡大になる場合を紹介した。まさに、諸刃の剣の機能を持つ。この2点を留意した整備または維持をしていく必要がある。石川ら(1988)の結果も参考に、津波減災機能を発揮するのに望ましい防潮林の条件について植生帯幅、植生帯構造と配置、防潮施設の併用の3つを以下のように整理する。

(1) 植生帯幅

漂流物の阻止機能は数列の樹木からなる林帯幅でも発揮されるが、水勢を減衰させ、津波による破壊力をかなり低下させるためには少なくとも30~40mの林帯幅が必要である。さらに大津波に対しては最小限70m以上の林帯幅が必要である。これについては、首藤(1985)も検討しており、津波浸水高さ3m以上、幅40m程度以下で植生帯の被害が発生している。さらに、植生帯のフロントで津波により大きな破壊を受けて、内陸部へ漂流したとしても、ある程度の幅があれば、残った植生帯が侵入を食い止めてくれるはずである。今後、単位幅あたりの植生の減災効果と津波に対する効果を定量的に評価すれば適切な植生帯の幅が提案できると考える。

(2) 植生帯構造と配置

クロマツ林の林帯構造では、下木が密生したク

ロマツ二段林が水勢を弱める効果が大きく望ましい。林帯配置については疎開した部分や欠如した部分があるとそこから海水が侵入して洗掘されることがあるため望ましくない。林内の道路についても津波の進入路となり被害をもたらすので直線的な経路はさける。防潮林は連続して設けて、川沿いには上流まで配置することが望ましい。

(3) 防潮施設の併用

防潮林により津波災害軽減効果はあるが、防潮林のみでは海水の侵入は防げない。平地が狭く、海岸近くまで家屋や施設がある場合には十分な幅の防潮林を設けることはできない。幅が広くても大津波に対しては防潮林効果の限界があるので、防潮堤・防潮護岸等の防潮施設を併用する事によって対策をするべきである。

以上の要素を考慮し、植生帯の欠点を克服した津波防災のための計画を行うためには、以下のプロセスが必要であると考え。

1. 想定津波の設定(波高, 周期, 来襲回数など)
2. 背後地での安全レベル(期待される防潮林による減災効果)の合意
3. 植生帯の要素(特に, 幅と強度), 減災効果と想定津波規模の関係図の作成

1, 2を設定し, 3の関係図に入れることにより, 必要な植生帯の幅と強度が評価できるものと期待できる。この関係図は, 現地調査結果のみならず, 植生帯の抵抗モデルを考慮した数値シミュレーション結果を併用して作成する必要があるものとする。また, 植生帯の効果(絶対値)は, 背後地の場所や減災の定義さらには津波の来襲規模によって大きく変わるので, 例えば, 減災効果を植生の前後においてその有無の差を相対的に議論することが望ましい。

参考文献

- 石川政幸・工藤哲也・松岡広雄：日本海中部地震津波時の海岸防災林の効果と被害, 治山, No. 28 (4), pp. 4-10, 1983.
- 今村文彦・柳澤英明：津波減災のための植生帯の利用, 公園緑地, Vol. 66, No. 4, pp. 12-17, 2005.

首藤伸夫：防潮林の津波に対する効果と限界－過去の事例による判定－, 東北大学工学部津波防災実験所研究報告, 第2号, pp. 1-38, 1985.

原田賢治：防潮林の津波減災効果に関する水理学的研究, 東北大学博士学位論文, p143, 2003.

原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦：防潮林の津波に対する減災効果の検討, 海岸工学講演会論文集, 第47巻, pp. 366-370, 2000.

松田義弘・佐瀬旭・遠田浄・澤田正光・濱地宏明・丸橋雄一・山口伸：西表島仲間川マングローブ水域における環境調査, 東海大学海洋研究所研究報告, 13, pp. 1-15, 1992.

村井宏：地震・津波と海岸防災林－日本海中部地震津波の被災事例－, 林業技術, No. 501, pp. 15-18, 1983.

柳澤英明・越村俊一・後藤和久・今村文彦・宮城豊彦・林一成：マングローブ林内を遡上した津波の流動とその破壊条件－2004年インド洋大津波によるタイ KhaoLak での被害調査－, 海岸工学講演会論文集, 第53巻(印刷中), 2006.

2. 樹林帯の氾濫流抑制機能

秋山 壽一郎*

2.1 はじめに

河川に沿って帯状に設けられた樹木群のことを樹林帯あるいは河畔林という。樹林帯には鳥類の生育場所や魚つき林あるいは沿川地域における自然緑地としての環境面だけではなく、洪水流や氾濫流の流勢を弱めるなどの治水面での機能と効用があるといわれている。後者は、いわゆる水害防備林(水防林)¹⁾としての働きであり、先人の知恵として古くから用いられてきた伝統的治水技術のひとつである。水防林には、築堤等の治水施設の整備に伴い、整理・縮小されてきた歴史的経緯があるが、今日でも笛吹川(山梨県), 吉野川(徳島県), 錦川(山口県)など全国各地に数多く残っている。

堤防上を含む河川区域内の樹林帯を一般に樹林帯というが、堤外地あるいは堤内地に設けられた樹林帯を指している場合もしばしば見受けられる。また、樹林帯が設けられた範囲によって、そ

* 九州工業大学工学部建設社会工学科

の治水上の働きに違いが生じる場合もあるので、ここでは堤外、堤内および河川区域内に設けられた樹林帯をそれぞれ堤外樹林帯、堤内樹林帯および河川区域内樹林帯のように区別して呼ぶこととする（ただし、このような区別が不要あるいは誤解が生じない場合は、単に「樹林帯」という）。

先の改正河川法（1997年）では、河川環境の整備・保全の一環として、堤防機能を維持・増進するための河川管理施設として樹林帯を適正に整備または保全することが明記されたことは周知のとおりである。堤外樹林帯は、河道での洪水流の水位上昇や土砂堆積による河積の減少あるいは流木化などの治水上の支障をもたらすことがある反面、透過性水制のような役割を果たし、堤防や低水路の保護などの効用を発揮することもあることが知られている。このため、樹林帯の治水上の功罪を見極めつつ、適正に維持管理していく必要があるが、このような計画高水を対象とした河道計画の立場から、堤外樹林帯の整備・保全法や水理解析技術を取り扱った調査・研究は数多く、また整備・保全の基準²⁾としてもまとめられている。

そのような堤外樹林帯の取り扱いに象徴されるように、これまでのわが国の治水対策の基本的な考え方は、「洪水氾濫の防止を基本とする防災」であった。ところが、近年の自然外力の増大などの自然的状況や、限られた投資余力などの社会的状況の変化を受け、「洪水氾濫による被害最小化を基本とする減災」への転換³⁾がこれからの治水対策の考え方として打ち出されている。

“減災”への転換は、端的に言えば、水災を危機管理として捉えることである。このことは、集中豪雨の発生、施設能力を超える外力がもたらす浸水状況などを的確に予知・予測する技術や、“減災”に向けた種々のハード整備とソフト対策のための方法論ならびにそれを具体化する技術的バックアップが必要となることを意味する。したがって、たとえば越水箇所、越流・侵食プロセスと堤防の安全性、破堤プロセス、氾濫流量、都市部での複雑な浸水プロセス、各種減災施設の機能などを事前に、それもできる限り正確に予測・評価できる技術がこれから重要となっていく。

減災施設の一つで環境機能も兼ね備えたものが樹林帯である。その具体的な治水機能と効用には、以下の①～④があるといわれている⁴⁾。

- ① 越流時における堤防の安全性の向上
- ② 破堤部の拡大抑制
- ③ 氾濫流量の低減
- ④ 木・土砂堆積の防止、表土流失の低減

しかしながら、これらの働きについて定量的に論じた研究や技術資料は、著者の知る限り極めて少ない⁴⁻⁶⁾。もう少し踏み込んでいえば、樹林帯が設けられていない状況での氾濫流量の評価や越流破堤プロセスの予測（これらが樹林帯の治水機能と効用を論じる上での基本となる）といったことも古くて新しい河川工学の課題として残っている。このように、減災施設としての樹林帯の適正な整備・保全法や、そのための水理解析技術は定かにはなっていない。

破堤については、堤体の質や裏法の植生の状態によって破堤状況が異なってくるなど、その個別性の故に一律に論じることが難しい一面があり、今後の研究の進展を待つところが大きい。また紙面の都合もあるので、以下では、上記した①と③の治水機能と効用に焦点を絞り、樹林帯の氾濫流抑制機能ならびに樹林帯の氾濫流抑制機能と減災機能について若干検討してみたい。ただし、樹林帯が流失した場合は流木化し、家屋の損壊などの被害の拡大を招く恐れがあるので、氾濫時の倒木および流失に対する耐性が十分であることがここでの議論の前提である。

2.2 外水氾濫解析と氾濫流量

外水氾濫解析モデルの再現精度は、洪水・氾濫流モデル、標高データ及び氾濫流量（河道と氾濫原との雨水のやり取り）の各精度と破堤の取り扱いで概ね決まってくる。氾濫流量は外水氾濫の主因であり、また破堤の原因の7～8割は越水⁸⁾であることから、堤防の安全性とも深く係わっており、その評価はたいへん重要である。

氾濫流モデルにはポンドモデルや2次元不定流モデルなど種々なタイプのものであるが、外水氾濫解析モデルでは、通常、河道での洪水流と氾濫

原での氾濫流を別々に解析し、河道と氾濫原との間に内部境界条件（氾濫流量式）を設け、氾濫流量を評価する方法が取られる。ここでは簡単のため、そのような外水氾濫解析モデルを「接続モデル」と呼ぶこととする。接続モデルでは、一般に氾濫流量式として越流公式が用いられるので^{例えば、7)}、以下では越流公式と氾濫流量について考えてみたい。

越流公式とは、堰や越流堤防などの越流施設を越水する流れを1次元の正面越流として取扱い、流量式として表したものである。越流流量は越流施設の断面形状などの影響を受けるので、模型実験を介して、その影響を流量係数として評価する方法が取られる。代表的な越流公式である本間公式では、単位幅当たりの越流流量 q_0 (m^2/s) が式(1)のように与えられる。

$$\begin{aligned} \text{完全越流: } h_2/h_1 < 2/3 \text{ では, } q_0 &= C_1 h_1 \sqrt{2gh_1} \\ \text{潜り越流: } h_2/h_1 \geq 2/3 \text{ では, } q_0 &= C_2 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 h_1 と h_2 はそれぞれ堤防天端を基準として高い方と低い方の水位 (m) であり、本間公式の流量係数は堤防の法面勾配及び上流水深/堤防高に依存し、完全越流では $C_1=0.31\sim 0.33$ 程度の値を取る。

このように、越流公式は正面越流を対象としたものであるが、河道に沿って横越流する氾濫流量の算定にも用いられる。すなわち、河道に沿った単位長さ当たりの氾濫流量 q が式(1)の越流公式で評価され、 q に越流区間長 L を乗することで、全越流氾濫流量 $Q (= Lq)$ が算定される。氾濫シミュレーション・マニュアル(案)⁷⁾では、堤防断面形を長方形としたときの流量係数が採用されており、その値は $C_1=0.35$ と $C_2=0.91$ である。また、破堤部からの氾濫流量についても越流氾濫と同様に取扱われ、越流区間長を破堤幅に置き換え、全破堤氾濫流量が算定される。この場合、 h_1 と h_2 はそれぞれ破堤部敷高を基準として高い方と低い方の水位 (m) となる。

なお、完全越流公式は築堤河川からの完全越流、破堤区間あるいは掘り込み河川から射流状態

で越水あるいは溢水する場合に、一方潜り越流公式は築堤河川からの潜り越流、破堤区間あるいは掘り込み河川から常流状態で越水あるいは溢水する場合に適用できる。

(1) 氾濫流量（樹林帯無し）

樹林帯が設けられていない状況での氾濫流量について考えてみたい。この状況が、樹林帯の治水機能と効用を論じる上での規準となることは先述した。

計画高水を超えた洪水は、一般に河道に対してある角度（流向）をもって堤外地から堤内地へ斜め越水し氾濫流となる。したがって、越流公式で氾濫流量を評価しようとすると、流向補正が必要となる。このようなことから、模型実験に基づき、越流氾濫流量については河床勾配、破堤氾濫流量については河床勾配及び死水域に関する補正が式(1)に対してなされた実用氾濫流量式が提案されている⁸⁾。

しかしながら、流向は、一般に、完全越流状態では河道特性（平面・縦断・横断の各形状、堤外樹林帯など）や洪水流の流れの状態（常流、射流）、破堤氾濫では破堤形状などの諸々の影響を受け、潜り越流状態では堤内地の諸条件（地形起伏、堤内樹林帯、盛り土や家屋等の構造物など）と氾濫流量そのものの影響を受ける。

接続モデルでは、一般に越流公式から算定された氾濫流量とそれに基づく堤内地の氾濫流解析から堤内地水位が決定されるが、潜り越流状態では越流公式に堤内地水位が含まれているので、厳密には閉じた形になっていない。また、仮に堤内地水位が100%正しく予測されたとしても、適正な氾濫流量を与える堤内地水位を特定することはたいへん難しい。このことは、掘り込み河道から常流で溢水する場合でも同じである。これは、河道と氾濫原との水のやり取りを内部境界条件、つまり氾濫流量式で評価するために生じる問題である。

外水氾濫解析モデルの再現精度が洪水・氾濫流モデル、標高データおよび氾濫流量の各精度に依存することは先述した。これまでは、氾濫解析の再現精度を大きく左右する標高データに数mの

誤差が含まれていることも稀ではなかったので、氾濫解析と氾濫流量の精度はあまり議論の対象とはならなかった。しかし最近では、レーザプロファイラや航空写真測量により、 $\pm 0.2\text{m}$ 程度のかなり詳細な標高データを取得することが可能となってきた。また、精度の高い2次元浅水方程式の数値解析法も登場しており、外水氾濫解析の信頼度向上に向けた環境は整いつつある。問題は、氾濫流量の精度である。結論から先にいえば、越流公式が常に正しい氾濫流量を与えるという保証はない。

(2) 氾濫流量（樹林帯有り）とその他の治水機能と効用

樹林帯は河道と氾濫原の境界に位置しているので、計画高水を越える洪水のふるまいに影響を及ぼす。堤外樹林帯は河道内水位にも関係するので、「減災」の視点から樹林帯の働きを考える上で少しややこしい一面がある。そのようなことから、ここでは堤内樹林帯に限定して、その減災機能について考えてみたい。

完全越流状態では、築堤河川については氾濫流量は重力だけで決まるので、上記した③の働きは期待できないであろう。しかし、堤内樹林帯の密度や幅が十分であれば、ダムや越流堤下流に設けられた減勢工のような役割を果たし、跳水が起こる。上昇した水位は堤防裏法に沿って流れ下る氾濫流の流勢を緩衝し、裏法尻部での洗掘、さらにはその進行によってできる落ち堀形成の抑制も図られると考えられる。よって、①が期待できよう。また、堤内樹林帯が流水抵抗となることで、堤内地水位 h の上昇と氾濫流の流速 U の低減が見込め、掃流力と流体力 ($\rho h U^2$) も低減されると予想される。破堤区間あるいは掘り込み河川からの越水については、常流で越水する場合は堤内樹林帯が流水抵抗となり、③が期待できよう。射流で越水する場合には、堤内樹林帯により跳水が引き起こされ、流水抵抗にもなるので、①と③が期待できよう。この場合も堤内樹林帯の密度や幅が十分なことが条件となる。

一方、潜り越流状態では、堤内樹林帯が流水抵

抗となり、堤内地水位の上昇が見込めるので、③が期待できよう。むろん、流木などが堤内樹林帯に集積されれば、その効果は増大する。

以上のように、氾濫の形態（築堤、破堤あるいは掘り込み）と氾濫流の流れの状態（常流、射流）、樹林帯の設置状況（位置、密度、幅）および堤内地水位によって、堤内樹林帯の働き具合は異なってくる。樹林帯の機能は水理的には流水抵抗としてのそれであるので、流速の低減と水位の堰上げが発揮されるような設置状態であれば、総じて①と③の治水機能と効用があると考えられる。

実際、樹林帯の密度と幅が大きくなるにつれて氾濫流量が低減される、との報告がなされている⁴⁾。その詳細は、報告書⁵⁾にまとめられている。本報告書は、樹林帯を減災施設として取り扱った数少ない貴重な資料であるが、ここでは正面越流を対象として、越流公式と模型実験に基づき、樹林帯の氾濫流量抑制効果などに関する系統的な検討がなされている。樹林帯は河道と氾濫原の間にあるので、越流公式の枠組みの中でその治水機能を評価しようとする、最も単純な1次元の正面越流として取扱った場合でも、堤体の断面形状、樹林帯の設置条件及び越流の状態を考慮して、流量係数として評価しなければならなくなる。このため、膨大な量の模型実験が必要となるが、現行の洪水氾濫解析法に沿ったひとつの評価法であることは間違いない。しかしながら、先に指摘した氾濫流の流向や堤内地水位の取り方など、越流公式で氾濫流量を評価する際に生ずる問題点はそのまま残っている。

2.3 氾濫流量の評価及び堤内樹林帯の氾濫流抑制機能と減災機能

筆者ら⁹⁻¹¹⁾は、都市域での内水・外水氾濫の予測と減災諸策の評価・検討手段として、「洪水氾濫・浸水対策シミュレータ」（以下、「シミュレータ」という）を開発している。現時点では、本川等の河川や用・排水路網、家屋群や道路等の市街地構造、浸水によって水没/非水没となる地形起伏、樹林帯等の微小な物体群、雨水排除システム、排水機場・水門の運用、などを取扱うことができる。

同モデルの中核をなす洪水流・氾濫流サブモデル^{12,13)}は、非構造格子を用いた有限体積法に基づき、空間平均操作された2次元浅水方程式を離散化し、空間積分に流束差分法(FDS)を用いた高精度・高解像な平面2次元不定流モデルである。筆者は、河道に沿って非構造格子を配置し、河道と氾濫原をこの平面2次元不定流モデルで包括的に解く解析法を河道・氾濫原包括解析(以下、「包括解析」という)と呼んでいる。

包括解析の最大の利点は、河道特性と氾濫原特性を考慮した上で、河道から溢れながら流下する洪水流と堤内地での氾濫流、あるいはその逆のプロセスを一体的に解析できるところにある。氾濫流量は流向に沿った流速と越流水深の積で算定されるので、氾濫流量式で氾濫流量を評価する際に発生する問題(流向、堤内地水位の取り方)は回避される。また、FDSに基づいているので、常射流が混在するような破堤氾濫を含む外水氾濫を的確に評価することができる。併せて、同サブモデルは樹木群に代表されるような計算格子より小さな物体群を空間平均された抗力として処理するので、河道と氾濫原の境界に位置する樹林帯を取り扱う上でも都合がよい。ただし、完全越流状態では堤防の裏法肩傍で静水圧分布に従わない流れとなるが、同サブモデルは平面2次元モデルであるので、これに起因した誤差は含んでいる。

以下では、シミュレータに基づき、氾濫流量ならびに堤内樹林帯の氾濫流抑制機能と減災機能について調べてみたい。

(1) 氾濫流量の評価

図2-1は、筆者らが行った氾濫流量に関する模型実験結果(未公表)と予測結果(図2-1a:越流公式, 図2-1b:包括解析)を比較したものである。実験の設定条件は、河道については矩形断面の掘り込みあるいは2割勾配の築堤(堤防敷幅:0.1m)の直線河道(河道幅:0.25m)とし、それぞれについて堤内樹林帯を設置あるいは無設置としている。堤内樹林帯(幅:0.12m, 透過係数:0.64m/s)は、掘り込み河川では河道との境界から、築堤河川の堤防表法尻から0.16m離れた位置に带状に設置している。

図2-1bには、種々の条件下(河道の形態, 越流の状態, 樹林帯の有無)において、包括解析がほぼ正確に氾濫流量を評価できることが示されている。また、計算格子より小さな物体群を空間平均された抗力として処理することで、樹林帯が氾濫流量に及ぼす影響を十分正しく評価できることも示されている。図2-1aには、樹林帯の有無にかかわらず、越流公式は常に正しい氾濫流量を与えるわけではなく、特に掘り込み河道や築堤河道の潜り越流状態では、2倍以上も氾濫流量を過大に

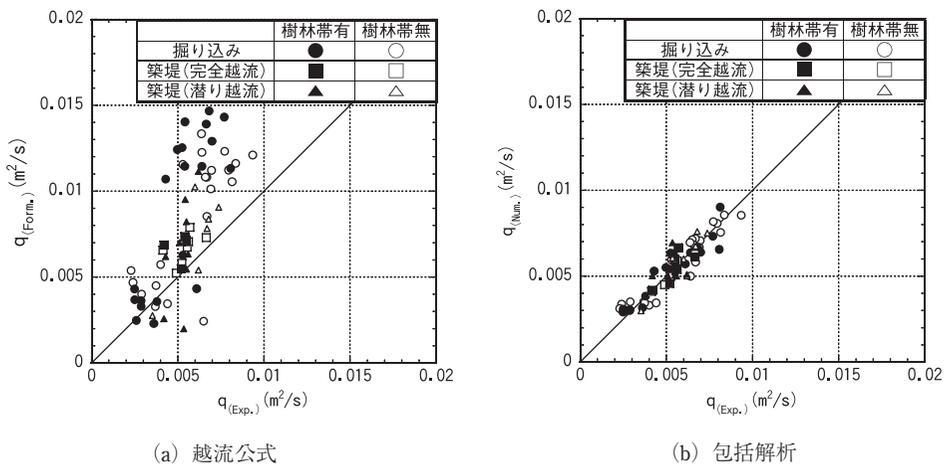


図2-1 氾濫流量

評価する場合があることが示されている。また、紙面の都合で図は省略するが、氾濫の状態にかかわらず、一般に流向が大きくなると誤差が大きくなる傾向があることや、潜り越流状態では堤内地水位の取り方に起因した誤差が生じることも確認された。なお、樹林帯が設置された状況での越流公式を用いた評価では、実験から得られた水位を用いて潜り越流状態での氾濫流量を算定している。この場合、樹林帯が堤内地水位に及ぼす影響は実験値に反映されているので、先に触れたような樹林帯に関する流量係数の補正は行っていない。

以上から明らかなように、樹林帯の有無にかかわらず、越流公式では氾濫流量が正しく評価できない場合がある。堤内地水位の取り方と流向が誤差を生む原因である。前者は内部境界条件を設定するために、後者は流向が洪水氾濫流の特性量であるために発生する。いずれも接続モデル固有の問題である。これらを解決しない限り、氾濫流量の評価、ひいては接続モデルの信頼性に曖昧さが残ることになる。

(2) 堤内樹林帯の氾濫流抑制機能と減災機能

1986年7月山陰豪雨災害の越流・破堤氾濫を対象としてシミュレーションを実施した。本氾濫では、氾濫水が市街地を貫通する街路などに集中し、破堤付近のみならず市街地各所で木造家屋が流失・全壊する甚大な被害となった¹⁴⁾。いわゆる、沿川流下型の市街地越流・破堤氾濫の典型的な事例である。

解析に用いた三隅地区の市街地構造、標高データ、破堤形状、家屋の被害状況などは、河田・中川の災害調査報告¹⁴⁾に基づいている。本報告はたいへん優れたものであるが、洪水ハイドログラフ、破堤時刻、浸水プロセスやその経時変化などについて不明な点も多く、また今から20年前の調査結果であるので、標高データの精度も高くはない。そのようなことから、堤内樹林帯の減災機能の評価を目的として、樹林帯の有無の視点から実施した相対的なシミュレーションとして見て頂くとは有難い。

シミュレーションは、堤内樹林帯(幅:15m~20m, 透過係数:15.2m/s)を設置あるいは無設置の状況について、瞬間破堤を想定して実施した。樹林帯は、破堤区間前後にわたって三隅川に沿った堤内地(堤防と街区との間)に設置した。

図2-2は、浸水深と流速ベクトル(図2-2a:樹林帯無し, 図2-2b:樹林帯有り)の一例(越水開始から65分後(破堤から5分後))を示したものである。同図に示しているように、災害調査報告¹⁴⁾によれば、地点Aのように堤防が完全に流失した箇所と地点Bのように堤防が一部残存した箇所がある。シミュレーションは、このような破堤形状を踏まえ実施した。シミュレータが、三隅川と三隅地区(本例では、標高、市街地構造、樹林帯)の各特性を踏まえた上で、洪水流と氾濫流の挙動や河道と氾濫原での雨水のやり取りを解析・評価できることが示されている。また、樹林帯が破堤部付近の氾濫流を河道側へシフトさせ、堤内地へ向かう氾濫流を抑制・制御していることや、浸水深も全体的に若干低減していることも示されている。すなわち、樹林帯には氾濫流の抑制機能と制御機能が認められる。

図2-3に破堤区間の堤防天端上の地点Aと地点BでのFroude数の時系列(経過時間は河道で与えた流量ハイドログラフ¹⁴⁾と一致させている)を示す。樹林帯の有無にかかわらず、破堤前は射流状態で越流していた氾濫流が、破堤後は短時間のうちに常流状態となる様子が示されている。破堤氾濫における流れの状態の急変は、以下で示すような越流プロセスのみならず、氾濫流や洪水流の挙動に少なからず影響を及ぼす。

図2-4と図2-5に越流水深と越流流速の時系列をそれぞれ示す。なお、越流水深については、破堤前は堤防天端から、破堤後は地点Aでは地盤高から、地点Bでは堤防残存部の天端から測った水深として表示している。いずれの地点においても、樹林帯の働きにより、破堤後の越流水深が増大し、越流流速が低減することが示されている。すなわち、樹林帯には越流による堤防侵食を抑制する働きが認められる。

図2-6に破堤区間からの全氾濫流量の時系列を

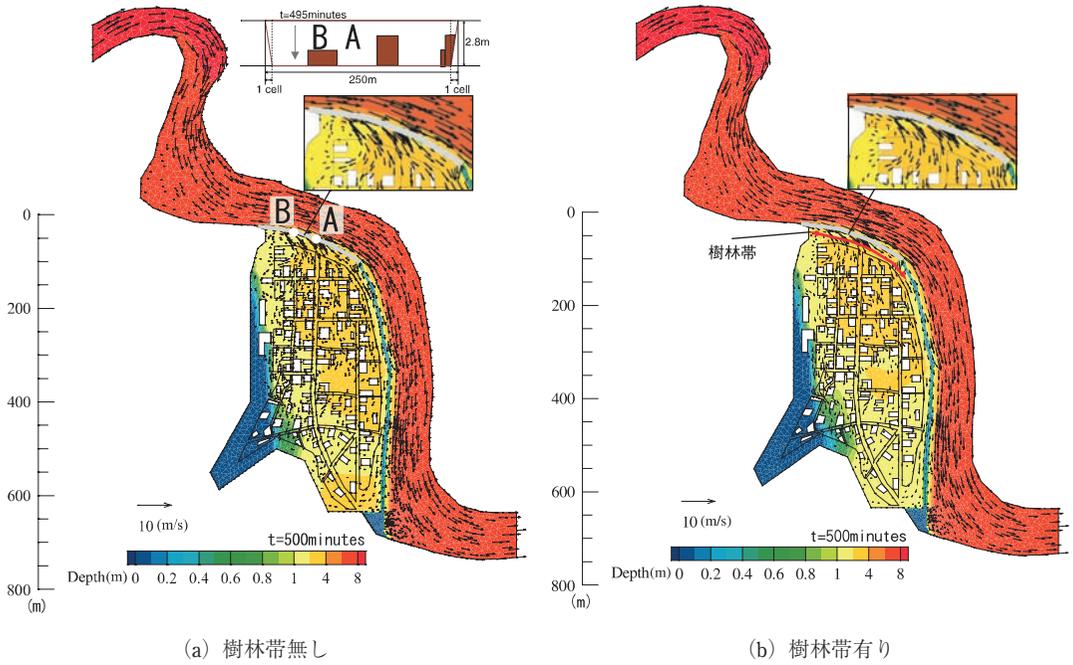


図2-2 浸水深と流速ベクトル

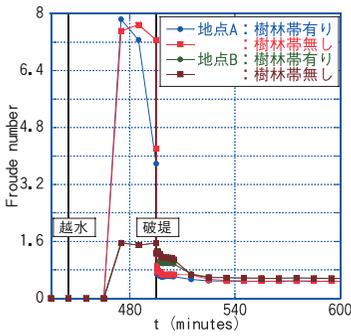


図2-3 Froude数の時系列

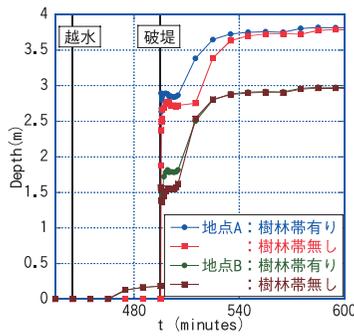


図2-4 越流水深の時系列

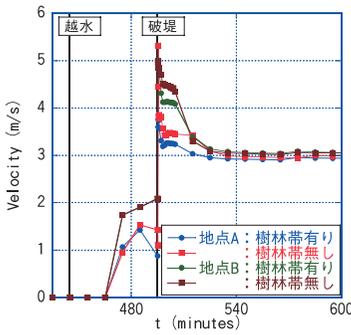


図2-5 越流流速の時系列

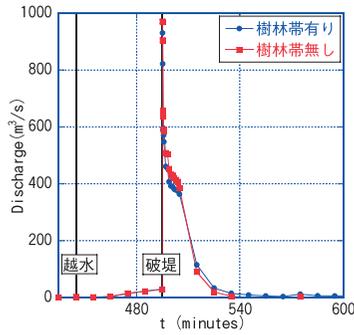


図2-6 氾濫流量の時系列

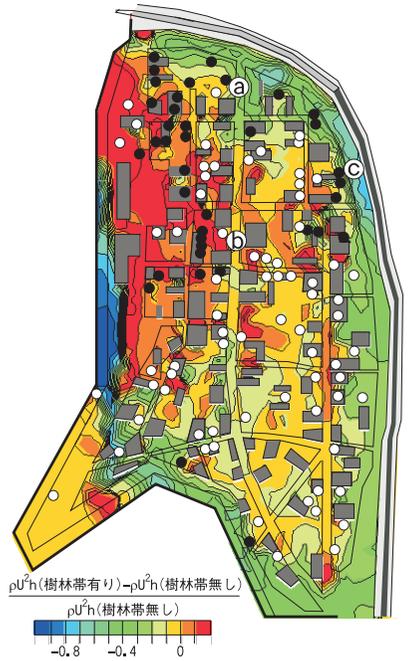


図2-7 最大流体力の低減率の空間分布

示す。樹林帯の有無は破堤前（完全越流状態）の全氾濫流量には関係しないこと、樹林帯には破堤直後からしばらくの間は全氾濫流量を低減させる働きがあること、その結果堤内地水位の上昇が遅くなるので、その後は樹林帯が無設置の場合よりも若干全氾濫流量が増加すること、最終的には堤外地と堤内地との水位差がなくなり全氾濫流量がゼロになること、などが示されている。すなわち、樹林帯には浸水深の上昇を遅延する働きが認められる。

図2-7に最大流体力の低減率（＝樹林帯有り－樹林帯無し）/樹林帯無し）の空間分布を示す。図中の●と○は、それぞれ災害調査報告¹⁴⁾で報告されている流失家屋と全壊家屋を参考のため示したものである。樹林帯により、全体的に最大流体力が低減していること、破堤区間近くと三隅川沿いの堤内地では最大流体力の低減が顕著であること、主街路の右側では最大流体力が低減する傾向にあるが、左側では逆に増加する傾向にあること、などが示されている。図中の主街路に沿った破堤区間近傍の地点①とそこから少し離れた地点②での最大流体力比（＝樹林帯有り/樹林帯無し）はそれぞれ0.72と0.96、また三隅川に沿った地点③では0.22であった。すなわち、樹林帯には堤区間近傍や氾濫流が集中するところでの最大流体力を低減させる働きが認められる。

以上のように、堤内樹林帯には減災施設としての働きがある。ただし、このシミュレーション結果が示すように、樹林帯が洪水流や氾濫流に及ぼす影響は必ずしも局所的ではない。このため、その設け方次第では逆に被害が拡大する箇所が出てくる可能性がある。このようなことから、“減災”では、樹林帯が設けられた区間だけではなく、その上下流での洪水流の挙動や全体的な氾濫プロセス、流域の土地利用形態などを踏まえた上で、住民の理解と協力を得ながら樹林帯を適正に整備・保全していく必要がある。

2.4 まとめ

これまでの“防災対策”とこれからの“減災対策”とでは、治水対策としての基本的な考え方が

異なるので、水理解析法にも違いが生じてこよう。そのような立場から、筆者が進めている「洪水氾濫・浸水対策シミュレータ」を用いた河道・氾濫原包括解析を紹介し、氾濫流量ならびに堤内樹林帯の氾濫流抑制機能と減災機能について若干の検討を行った。最後に、“減災”に向けた河川技術の確立が急務であることを強調して、本稿をむすびたい。

ここで示した筆者らの研究の一部は、科学研究費補助金 基盤研究B（課題番号：17360237、研究代表者：秋山壽一郎）の助成を受け実施したものである。また、国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室より、樹林帯に関する貴重な研究資料の提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所河川部：水害防備林調査，土研資料第2479号，1987.
- 2) リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き，山海堂，1999.
- 3) 社会資本整備審議会河川分科会，豪雨災害対策総合政策委員会：総合的な豪雨災害対策の推進について（提言），http://www.mlit.go.jp/river/link/link_kanren/index.html，2006年8月10日.
- 4) 国土交通省河川局治水課監修：堤防に沿った樹林帯の手引き，山海堂，2001.
- 5) 坂野章：樹林帯による破堤後の減殺効果に関する検討，国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室資料，2002.
- 6) 重枝未玲・秋山壽一郎：数値シミュレーションに基づく堤防に沿った樹林帯の治水機能の検討，土木学会論文集，No.740/II-64，pp.19-30，2003.
- 7) 栗城稔・末次忠司・海野仁，・田中義人・小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル（案）－シミュレーションの手引き及び新モデルの検証－，土研資料第3400号，1996.
- 8) 末次忠司：河川の減災マニュアル，山海堂，2004.
- 9) 秋山壽一郎・重枝未玲：飯塚市を中心とした都市域のダイナミック氾濫解－2003年7月遠賀川豪雨災害を対象として－，水工学論文集，第49巻，pp.619-624，2005.

- 10) 秋山壽一郎・重枝未玲：河道特性と市街地構造を考慮した越水・破堤氾濫シミュレーション，水工学論文集，第50巻，pp. 691-696，2005.
- 11) 秋山壽一郎・重枝未玲：河道・氾濫域包括解析による氾濫流量の評価と市街地破堤氾濫解析，土木学会論文集（投稿中），2006.
- 12) 秋山壽一郎・重枝未玲・浦勝：非構造格子を用いた有限体積法に基づく1次および2次精度平面2次元洪水流数値モデル，土木学会論文集，No. 705/II-59，pp. 31-43，2002.
- 13) 重枝未玲・秋山壽一郎：市街地構造を考慮した氾濫解析モデルの総合的な検証，水工学論文集，第48巻，pp. 577-582，2004.
- 14) 河田恵昭・中川一：三隅川の洪水被害－洪水氾濫と家屋の被害－，京都大学防災研究所年報，Vol. 27，B-2，pp. 1-18，1984.

3. 都市植生の防火効果に関する考察

齊藤 庸平*

3.1 はじめに

あの阪神淡路大震災から10年以上の歳月が流れた。その後の状況を見ると，新潟県中越地震，スマトラ沖大地震とインド洋大津波，さらに福岡西方沖地震と大地震災害に見舞われ，震災への対応は，常に今日的課題であることが分かる。

阪神淡路大震災では，日常時に都市環境に安らぎと潤いを与えてくれる都市植生が，震災に大いに役立つことを改めて知らされた。特に公園の樹林帯や庭の樹木が，多発した火災の拡大防止に寄与したことは記憶に新しい。この効果は，関東大震災等の経験も含め古くより知られているものである。その一方で，市街地周辺の既存の樹林地（里山林等）では，林野火災の増大が懸念されている。管理放棄された里山林が増え，それらには落葉，下草，倒木など多量の可燃物が堆積したままになっている。特に里山林は，住宅地等に近接しているという立地特性から，家屋の延焼に繋がる可能性が高く，火災発生を極力抑えることが急務の課題となっている。¹⁾

都市植生と防火に関する相反する事実が存在しているかに見える。本稿では，この点に着目し

て，震災での都市植生の防火効果の実際とそのメカニズムを紹介し，次いで震災火災対策に都市植生をどう活かすかについて考えていくこととする。言い換えるなら，日頃接している都市植生が災害時に火災などの危険から人々を助けてくれるという素晴らしい機能を持っていること，しかしきちんと都市植生の特性をふまえて活用管理しないと，場合によっては，火災に対して危険な場合もあることを知ってほしい。

本稿では，都市内に存在する既存の里山林や公園の植栽帯，街路樹から住宅の庭木等まで総称して都市植生と称するものとする。

3.2 大震災での都市植生の防火効果

(1) 避難者の明暗を分けた樹木の存在

写真3-1は，東京都立清澄庭園である。東京都の下町江東区に立地する樹林と池が組み合わせられた林泉式の美しい庭園である。三菱財閥の創始者，岩崎弥太郎によって荒れていた大名屋敷跡を買収整備された庭園で，賓客の接待や社員の慰安に使われていた。現在は都の名勝に指定された都立公園となっている。この庭園は，関東大震災の際，避難した多くの住民の生命を猛火から守ったことでも知られている。

ここ以外でも関東大震災では，豊かな樹林におおわれた公園や庭園が防火効果を発揮した。そこで岩河（1984）の研究²⁾をもとに詳しく紹介してみよう。



写真3-1 大火から避難者を守った清澄庭園（現代の姿）

* 兵庫県立大学自然・環境科学研究所

清澄庭園（以下、旧深川岩崎邸）の存在する本所深川地区は最も火災の激しかった地区の一つである。ここには旧深川岩崎邸とほぼ同程度の面積（概ね4 ha ただし諸説有り）を有する本所陸軍被服廠跡の広大なオープンスペースがあった。両方とも数万の住民が避難した。前者は、周囲を高さ2 m 程度の煉瓦塀で囲まれ、その内部に高さ3 m、幅7 m の築山が囲み、その上にはシイ、イヌクス等の常緑広葉樹を主体とした植え込みがあった。邸内の中央には面積0.7 ha 程の池があり、カエデ、クロマツなどの樹林で囲まれていた。焼失家屋の近くのシイ類は黒焦、12m 程離れていた樹木は対熱面の葉は変色したが、裏は緑色を保っていたという。池の中島のクロマツは葉先が変色する程度の損傷を受けていたが、木造家屋（涼亭）は焼失を免れた。火流に攻められながらもここに逃げ込んだ2万余の人々の安全が確保された。

一方、後者は、西をコンクリートの建物（焼失）、南を電車通り、東を郵便局（焼失）北を道路によって囲まれた空地であった。周囲には鉄骨を組んだ板塀と1 m ほどの溝があったが、樹木がほとんど無い裸地であった。ここに安全を求めて多くの住民が殺到する。一説によると4万余の住民が避難し、家財道具とともに溢れていたという。しかし四方から迫った火災が合流し、大火災旋風となり避難者を襲った。関東大震災火災死亡者の半数以上の3万人を越える命が失われる結果となった。

ほぼ同面積であった両者に逃げ込んだ避難者の明暗を分けた第1の要素は樹林の存在の有無であったといえよう。ちなみに岩河はこれを「4 ha の明暗」と称している。この対比により、樹林の防火効果がクローズアップされることになり、特に林泉式の庭園の避難効果は、当時の市民に強烈な印象を与えた。震災後、本所陸軍被服廠跡に慰霊を込めた震災記念公園（現横綱町公園）が整備されるが、その整備にあたり「震災記念公園の主たる修景手法は、日本風の林泉式にすべきであるとの意見がそのまま実施計画となった」のであった。³⁾

このように都市植生は、避難地周辺にあって遮断

壁となり避難者を火の粉や熱から守ったのである。

（2）阪神・淡路大震災火災の拡大を防止

建設省建築研究所調査⁴⁾を基にその焼け止まり線を見ると、大半は広幅員の道路であった。樹木や生垣によるとみられる焼け止まりもあったが全般的にみるとかならずしも多いとは言えなかった。これは効果が低かったというよりも、市街地火災が発生した地区に遮断帯となるような都市植生が少なかったことが要因のひとつと考えられている。少ない存在ではあったが、都市植生は防火に寄与した。一例をあげるならJR 鷹取駅南の高橋病院周辺被災地区（焼失面積6.9 ha）では、大国公園のクスノキとイチチョウが炎や火の粉等の楯となり延焼拡大を阻止し焼け止まり線を形成した。筆者が2週間後に観察した結果では、対熱面側の樹葉は変色していたが、反対側はそのまま緑を保っていた（写真3-2）。現在でも幹には火炎の傷痕を見ることができ、震災を忘れてないための生きた証拠となっている。更に、庭の樹木群が、隣棟火災からの延焼を阻止したりする事例が多く報告されており、かなりの被害軽減効果があったことが認められている。

このように緑は、道路、河川、空地等のオープンスペースと共に延焼拡大を止める。街路樹などの樹木は不燃建物などとともに壁となり熱を遮蔽する。さらに樹木は火の粉を拡散させ飛び火延焼の危険も少なくする効果もあると言われている。1976年に戦後4番目の規模となる酒田大火をあげ



写真3-2 延焼を止めた大国公園の樹木
（震災2週間後）

ることができる。酒田大火では樹木の延焼防止効果が注目され、マスコミに大きく取り上げられた。岩河（1984）の調査によると焼失区域の北側のいわゆる寺町にはケヤキとクロマツを主体とした樹高20mを越える豊かな樹林群が列状に存在していたが、ここで火災が焼け止まった。風向の関係で、寺町の樹林帯とは火災が並行に進んだことも幸いしたが、適度な空隙を持つ樹林帯が、火の粉を遠方に拡散させる効果があったという。

以上の事例紹介から、樹木は、避難地周辺や延焼遮断帯の内部に存在し、遮断壁となり、延焼拡大阻止や避難者の生命保持の機能を果たす。しかし都市に存在する全ての樹木に効果があるわけではない。樹木を市街地のどこに配置するかが極めて重要となるのである。また、間接的には無秩序な市街地拡大の抑制や過密の解消に寄与することで火災危険を減らすこともあげられる。出火の発生は、市街地の木造密集度や建物倒壊率と関連することが既往研究で明らかにされている。市街地に緑地を増やすことで木造建物の密集度をおさえれば、出火危険は低下する。また出火率は、建物の倒壊率と連動して高まることも明らかにされており、既存の斜面樹林地等の保全により倒壊危険の高い軟弱地盤、斜面地などへの無秩序な建物建設を減らすことで、出火危険を減らすことができる。実は、こうした市街地の適正配置や過密解消は、火災に限らず震災対策の基本である。

3.3 緑の防火対策の基本的考え方

(1) 壁の効果⁵⁾

緑の遮断壁としての作用を整理する。遮断壁による防火のメカニズムは次のように考えることができる。図3-1において放射強度 E の火災から x だけ離れた受熱量を R 、木造家屋あるいは人間の許容放射熱量 Q とすると、 Q より R が大きいときは延焼または生命が危険に晒されることとなる。逆に Q より R が小さい場合には安全となる。このようなケースは x が十分に離れている場合であり遮断壁の必要はない。しかし、十分な間隔をとることが不可能な場合には、遮断壁が必要となる。そこで図3-2のように火災と受熱点の間に遮断壁

を設けると火災放射熱の一部が遮られ、隣接家屋の受熱量が R から R_0 に減少するであろう。そして $Q > R_0$ であれば類焼は阻止される。ここで $R - R_0$ が遮断壁の遮断力である。図3-3のように遮断壁を樹木に置き換えれば、樹木の遮断力 $(R - R_1)$ となる。ここで重要な点は、防火効果は、火災の放射熱を遮るには、火災の高さと遮断壁の高さと受熱点の位置の相対関係できまるということである。遮断壁が有りさえすれば全ての火災について延焼遮断したり避難者の生命を守れるわけではない。特に幾つもの火災が合流し、巨大な炎となる大火においては、遮断壁の上を越えて放射熱が避難者や家屋に到達する可能性が多くなる。つまり

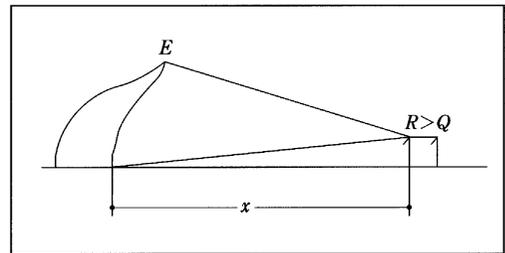


図3-1 火災と放射熱の関係

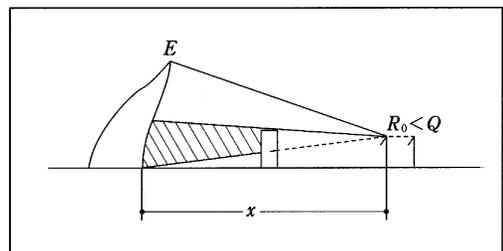


図3-2 不燃帯による遮熱の関係

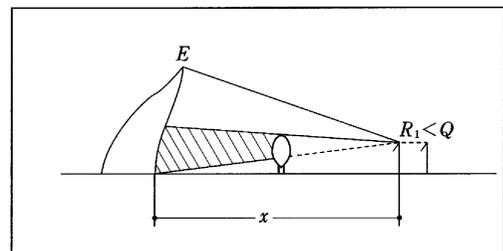


図3-3 樹木による遮熱の関係

火災規模特に炎の高さの予測に基づく遮断壁の高さの設定、遮断壁背後の市街地の位置や避難者広場の位置の設定が重要となる。

(2) 緑の遮断壁の問題点

遮断壁として樹木には、次の厄介な問題が存在する。

- ・ 不規則な隙間が存在し、不完全な遮蔽壁
- ・ 耐火性能に限界
- ・ 燃え草となる落葉枯枝の存在

まず、樹冠の枝葉の隙間、樹冠下の隙間などから放射熱の一部が透過し、完全な遮断体とならないのである。もっとも、これが火の粉の拡散、風の制御等に効果があると推測されているので一概に隙間の存在を否定できないことが更に評価を難しくする。

隙間は、樹種で異なることはもとより、個体でも少しずつ異なる。遮断壁としての定量的評価を困難にする要因となっている。しかし最近の画像解析技術の進歩により、写真などから高精度で比較的簡単に遮蔽率を把握することができるようになってきた。これらデジタル技術の応用を積極的に考えるべきである。それでも植物は生き物であり日々変化し、厳密に遮蔽率を把握したり予測したりすることは不可能である。植栽計画立案においては、まず、防火対策を実施していく上で最低必要な精度を見極める必要がある。その上で例えば樹木形状の類型化や樹木列や樹林全体を1つの遮断壁に見立てモデル化して、全体の遮蔽率を求めるなど必要な精度を確保する工夫を考えればよい。

(3) 樹木の耐火限界と水分

なんといっても一番の問題は樹木に耐火限界があることである。樹木は化学組成的にみると燃えるものである。しかし生きた樹木の耐火限界は高い。岩河の研究²⁾によると、多くの樹種は12,000kcal/m²hr～15,000kcal/m²hrまで着火することなく耐火力を発揮する。人間の耐火限界値の2,050kcal/m²hr程度や木造家屋の着荷限界値4,000kcal/m²hr程度と比べると極めて高い耐火力を有している事がわかる(表3-1)。

表3-1 樹木の発火限界 (岩河：1984)
(単位 kcal/m²h)

種別	樹種	
発火限界放射熱	常緑広葉樹	13,400
	落葉広葉樹	13,900
	針葉樹	12,000
木造建物耐火限界		約4,000
人の着火限界		2,050

注) kwで表示すると10,000kcal/m²h≒11.63kw/m²になる。なお、岩河の表を一部改変して作成。

この樹木の耐火性は、枝葉に含まれた水分の働きが大きく影響することが既往研究や調査により知られている。樹葉は火災で加熱されると水蒸気を放出し、その潜熱により自身の温度上昇を防ぎ、必要な水分がなくなるまで着火することなく高い耐火性能を発揮する⁶⁾。従って一般的には含水率が高いほど耐火力に優れているといっていよう。

含水率は、樹種により異なっている。表3-2は、木村、加藤(1949)による樹種別含水率を示したものである。それらによると、多くの樹種が50%以上の含水率を持っている。なかでも従来から耐火性の高い樹種といわれているイチチョウ、サンゴジュなどは70%を超す高い含水率を示している。しかし従来防火樹として知られているシラカシのように、低い含水率を示す樹種もある。さらに既往の実験結果を比較すると、微妙に樹種別の数値や順位が異なっている。これは、含水率は樹種別の違いだけでなく、その他の要因にもより変化することを示唆している。単純に樹種のみで防火樹を選択することは危険である。

つまり同じ樹種でも季節、生育状況、気象条件、樹齢等の要因で変化するので、高い耐火力を維持させるためには、条件を踏まえたきめの細かい選択や管理が必要となる。表3-3は、月別の含水率測定結果を示したものである⁸⁾。

これによると、まず、変化が少ない樹種と変化が大きいものが存在することが分かる。変化が少なく高い含水率を保持する樹種が、年間を通して防火管理上優位である。サンゴジュは変化が少な

表3-2 樹種別樹葉の含水率（木村・加藤，1949）

含水率	樹 種	
60%以下のもの	針葉樹	コノテガシワ (59.5) アカマツ (59.5) ドイツトウヒ (59.4) クロマツ (59.3)
	常緑広葉樹	アセビ (59.5) ヒイラギナンテン (59.1) クス (58.9) ビワ (55.9) ゲッケイジュ (55.9) シラカシ (55.0) カナメモチ (54.7) マテバシイ (54.5) ウバメガシ (48.6)
	落葉広葉樹	モミジ (59.3) ケヤキ (57.7) カシワ (48.9)
60%以上のもの	針葉樹	コウヤマキ (66.4) アスナロ (66.1) スギ (64.5) ヒノキ (63.3) ヒムロ (63.0) サワラ (62.7) ヒマヤラシード (62.1) カヤ (61.7) タマイブキ (66.7)
	常緑広葉樹	アオキ (69.6) ヤツデ (68.9) カクレミノ (67.7) マサキ (68.8) ユズリハ (66.4) モッコク (66.1) ネズミモチ (64.7) ツバキ (63.5) トベラ (63.0)モチノキ (62.5) サカキ (61.9) リュウキュウツツジ (60.9) サザンカ (60.7) イヌツゲ (60.0)
	落葉広葉樹	ヒヨウガミズキ (69.8) ミズキ (68.3) ムラサキシキブ (67.7) スズカケノキ (67.6) ヤマザクラ (67.0) サルスベリ (67.1) ボケ (67.0) ニセアカシア (66.9) マルバマンサク (66.2) アオギリ (66.0) ヤマブキ (66.0) カツラ (65.6) ハウチワカエデ (64.8) フジ (63.3) ハクウンボク (63.1) コデマリ (62.5) トチノキ (60.7) ナラ (60.4) ボダイジュ (61.9)
70%以上のもの	常緑広葉樹	シキミ (72.1) ジンチョウゲ (72.1) フイリアオキ (71.5) サンゴジュ (70.6)
	落葉広葉樹	アジサイ (88.0) ムクゲ (74.9) イチョウ (74.6) モクレン (72.8) キリ (72.3) ハコネウツギ (72.6) ホウノキ (70.3) ウメ (70.2)

表3-3 樹種別月別樹葉の含水率（石田・斉藤，2001）

（%）

月	常緑広葉樹						落葉広葉樹		針葉樹		
	アラカシ	サンゴジュ	ヒイラギ モクセイ	ヤマモモ	ウバメガシ	ヒラド ツツジ	クヌギ	コナラ	クロマツ	カイズカ イブキ	ヒノキ
4	57.2	55.4	50.4	55.2	64.2	60.2	65.4	55.6	48.0	55.7	54.8
5	76.1	56.3	50.2	55.4	72.9	59.3	68.9	67.7	48.7	58.3	61.8
6	55.7	56.8	50.1	52.6	46.6	61.4	47.1	51.9	57.5	55.4	63.1
7	49.2	60.2	50.1	54.9	46.9	63.8	54.0	51.8	62.6	61.8	66.1
8	47.4	64.0	47.5	52.0	47.6	57.4	46.9	58.6	50.5	57.4	60.2
9	44.7	65.4	46.3	54.3	44.2	65.8	48.0	52.5	63.2	58.5	51.6
10	45.2	65.4	46.0	56.8	46.8	63.4	47.5	42.3	54.6	55.7	57.2
11	47.5	63.7	47.0	55.4	50.1	58.2	46.4	41.7	50.2	53.6	56.2
12	45.7	60.3	50.2	67.2	52.6	56.6	11.8	-	48.0	51.4	58.4
1	47.9	66.5	50.9	49.8	45.3	54.0	11.1	-	51.6	52.8	55.0
2	48.0	66.2	49.5	51.2	47.3	54.2	-	-	47.3	50.8	54.9
3	52.1	65.3	49.8	53.5	58.2	55.2	-	-	45.8	52.4	55.2

く、55%から65%の範囲で推移している。それに対してコナラやクヌギは、最大では70%近くの含水率を示す一方11月には40%強まで減少し、その差は30%ほど大きい。この両者を見るかぎり落葉樹は、夏期以降含水率が低下していることがわかる。また樹種により変化の型も異なる。ウバメガシやアラカシのように春に多く夏を最小とするタイプとクロマツやカイヅカイブキのように夏に多く冬に少ないタイプに分けられる。これらの調査地である淡路島では、瀬戸内海地方の特徴である夏が比較的乾燥しており、それに合わせるように8～9月の林野火災が多いのが特徴となっている。ウバメガシのように夏に含水率が低い樹木は、火災危険が懸念されるタイプといわなければならない。実際、淡路島では、最近10年の傾向をみると、ウバメガシ林からの火災が半数を占めていた。これが夏に火災が少ない地方であるなら問題とならないかもしれない。このように季節別の含水率の変化をふまえ、その地域の気象特性と比べ、火災危険がより高い時期に含水率が高い樹種を選択し、その時期の含水率を維持する管理工夫があると、防火性能を向上させることができる。ただし、今回の実験結果を見るかぎりとしておきたい。つまり地域差、個体差の問題が残るからである。樹種別で含水率の個体差が大きいものと小さいものがあることが最近の研究で明らかになっ

ている。さらに同じ樹種でも、生育している地域で含水率に関する特性が異なることもあることも明らかにされつつある。まだまだ解明すべき課題が多く残っている。生き物を扱うことの難しさを知ってほしい。

樹葉が着火するときの含水率は着火源の強さや樹種により異なるが、山下ら⁶⁾は「樹葉が引火するときの含水率は、引火源の強さで異なるが、実験の結果から20%以下であると推測される」としている。また、落葉についても同様であり、筆者らが実施した林床可燃物燃焼実験⁹⁾(図3-4参照)でもクヌギ・コナラ林、アカマツ林、スギ・ヒノキ林、竹林いずれも落葉の層の平均含水率が20%以下だと燃焼しやすくなることが確かめられた。20%以上であれば、絶対に安全ということの意味するものではなく一つの目安であるが、防火植栽計画の立案や管理維持の目標にすることはできよう。

樹葉の耐火性は、水分を放出して温度上昇を防ぐことによることは先に述べた。初期の含水率が高くとも、短時間で水分を放出する樹種は、耐火性があるとはいえない。表3-4は、中村¹⁰⁾の105℃加熱による脱水時間を尺度に3段階に分類したものである。樹種によりまちまちであり、防火樹とされているサンゴジュはC級にランクされている。この点は不明である。表3-5は、類別に

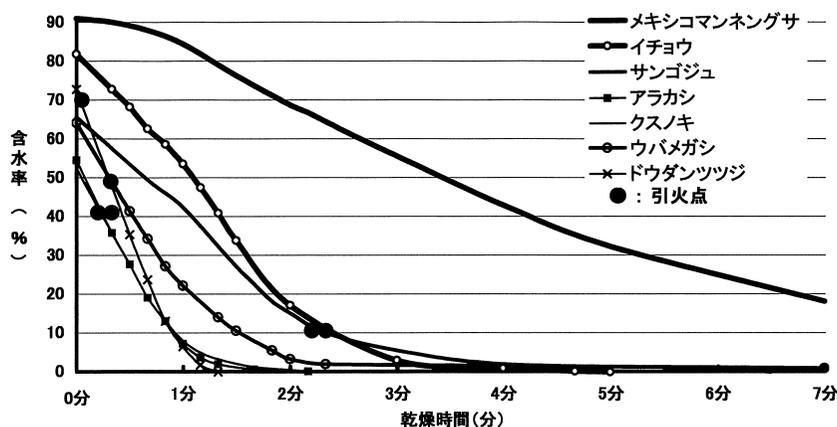


図3-4 加熱による樹種別含水率の減少推移と引火点 (石田, 齊藤, 2001)

表3-4 樹種別乾燥速度等級表 (中村, 1956)

(脱水温度105℃)

脱水時間	樹種名
A級：乾燥速度が遅い 75分以上もの	アケビ, アキニレ, アスナロ, アジサイ, エゴノキ, ハギ, ヘデラ・ヘリックス, ヒイラギ, ヒノキ, ヒサカキ, フウ, イイギリギ, イヌエンジュ, イヌマキ, カツラ, ケヤキ, コノテガシワ, コウヨウザン, キョウチクトウ, マサキ, モチノキ, ネグンドガエデ, ビラカンサ, サンシュユ, サルスベリ, サザンカ, シナノキ, シロダモ, タラヨウ, ツバキ, ツタ, ウツギ, ウワミズザラ, ヤマザクラ, ヤシヤブシ
B級：中等度 74分~50分	アベマキ, アカシア, アキグミ, アオギリ, アメリカヤマナラシ, アラカシ, アセビ, ビナンカズラ, ブナ, ドウダン, エノキ, エゾズリハ, ガマズミ, ハクモクレン, ホウ, イタビカズラ, イスノキ, イチジク, イチョウ, イロハカエデ, カラタチ, キンモクセイ, キリ, コブシ, コウヤマキ, クリ, クロガネモチ, クロマツ, クチナシ, マユミ, ミズキ, モッコク, ムベ, ナギナナノキ, ニセアカシヤ, レンギョウ, サワグルミ, シダレヤナギ, シンジュ, ソメイヨシノ, ソヨゴ, スズカケノキ, シャリンバイ, テイカズラ, トベラ, ツツジ, ツルグミ, ウバメガシ, ヤブニッケイ, ヤマモモ, ユーカリノキ, ユリノキ, ザイフリボク"
C級：やや乾燥が早いもの 49分~35分	アカマツ, アカメガシワ, アオキ, ハチク, ヒマラヤシダ, フジ, イヌツゲ, イタジイ, イチイガシ, イタヤカエデ, カイズカイブキ, カナメモチ, カラコギカエデ, キズタ, コナラ, クス, マダケ, ムクゲ, ムクノキ, ネム, ナンテン, サンゴジュ, シキミ, タイサンボク, ヤマハンノキ
D級：非常に乾燥が早いもの 34分以下	ビワ, クマザサ, クヌギ, マテバシイ, モウソウチク, ネザキ, シリビカガシ, スギ, トウカエデ, トチ, ツブラジイ, ヤダケ, ヤツデ

表3-5 類別平均乾燥時間 (中村, 1956)
(脱水温度105℃)

類別	樹種数	平均値	不偏分数
針葉樹	12	63.0	394
常緑広葉樹	48	61.0	559
落葉広葉樹	62	67.5	353
竹類	7	33.5	41

整理したものであるが、竹類を除き、針葉樹、常緑広葉樹、落葉広葉樹間では差がなかったとしている。初期含水率等では3者に差が見られた点からみると注目すべきことである。

筆者らは、実際の火災に近い200℃加熱で含水率と乾燥時間の関係を測定した。結果を図3-4に示したが、イチョウ、サンゴジュは、時間乾燥曲線が緩やかであった。また、最近、屋上緑化によく用いられるメキシコマンネングサは、時間乾燥曲線が極めて緩やかであり、熱に強いことがうかがわれる。その他の樹葉は、2~3分程度で急激に含水率が低下することがわかった。今回の実験

で、樹種による差があることは確認されたものの、加熱温度により乾燥曲線も異なることが想起され、明確な結論は得られていないのが現状である。今後、実験的なデータの蓄積が望まれるところである。

また、燃え方も問題となる。水分が失われた後、燃え草となり延焼促進とならないかを検証しておく必要がある。結論からいうならわが国の多くの樹種は一部の樹葉に着火しても部分燃焼で一旦消え、その繰り返して徐々に時間をかけて燃える。つまり一挙に樹冠が燃えることはなく、延焼促進要因となることはない。しかし一部樹種はその限りでない。着火すると樹冠全体に燃え広がるものもある。筆者はそのひとつの要因として揮発性含油成分を多く含んでいることによると推察している。既往の実験等によるとヒノキ、スギ、ニオイヒバ等の針葉樹やユーカリ、クスノキ等があげられる。これらは揮発性含油成分が比較的多いことが確かめられている。ただし成分は多種多様でその性質と構成により燃焼性が異なり揮発性含

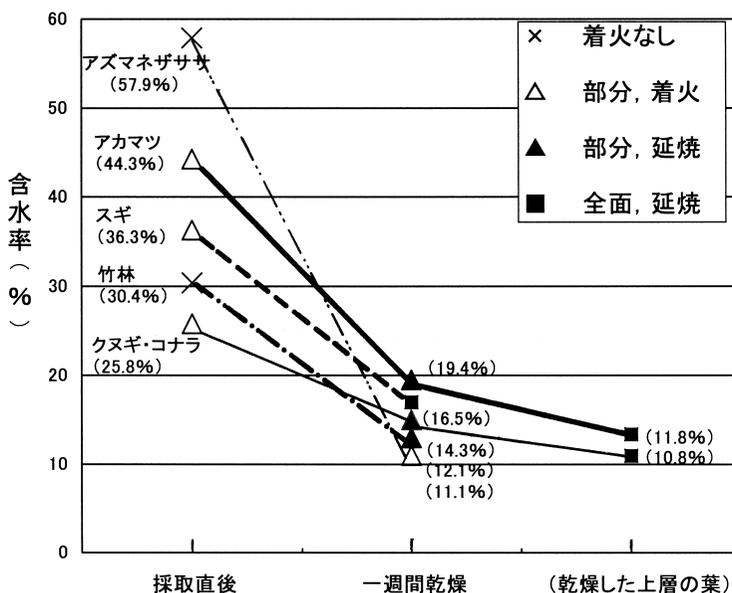


図3-5 落葉の燃焼と含水率 (齊藤, 岩河, 中村, 2003)

油成分が多いからすべて一挙に燃え上がるとは限らない。実験的に確かめられているのはいまのところカイヅカイブキのみである²⁾。従って、今後の多くの実験等による検証が必要である。

次いで林床部の管理について説明する。樹林は生きているので落葉、落枝が堆積したり、下草などが繁茂したりする。これらは燃え草であり火災が迫ってきた場合に着火延焼し、樹林帯の防火機能を場合によっては妨害する可能性がある。蓄積量を減らすとともに特に含水率のコントロールが重要となる。

ススキは夏期でも乾燥により下部が枯れ、着火の危険性が高い。ササ類は、ススキと比べると着火しにくい、一旦着火したあとは、延焼力は強く消火が困難と言われている。

3.4 緑の防火効果と林野火災との関係

上記のことは、林野火災にも通じることである。わが国の林野火災は、出火原因のほとんどがタバコの投げ捨て、焚き火の不始末など人為的要因である。従って地表の落葉等から発生することが圧倒的に多く、その後樹冠 (樹冠火という) や

幹 (樹幹火という) へ延焼していくことが普通である。北米等で見られる直接樹冠部から延焼することは、ほとんどないといってよい。つまり林野火災の危険性は林床の落葉、落枝、倒木等の可燃物の量と性質に大きく左右されるといってよい。落葉は、種類、乾燥度、くさり具合、堆積量で燃焼性が異なると言われている。例えばクヌギ・コナラ等の落葉広葉樹は、表層部が乾燥し易く、燃え広がりが早い。また針葉樹はゆっくりしかし高温で内部まで燃える。広葉樹に比してリグニンが多くくさりにくいので堆積し易く量に注意する必要がある。我々が行った林床部の燃焼実験⁹⁾の結果では、含水率25%~60%の採取直後では、いずれの樹種も着火しなかった。20%以下の場合ではスギ林床 (16.5%) やアカマツ床林 (19.4%) で延焼が確認された。10%前後まで下がると樹種に係わらず全体延焼した (図3-5)。また、様々な里山の含水率について丘陵部に開発された首都圏地区及び関西地区の新市街地 (多摩ニュータウン地区、飯能南台地区、北摂三田地区) に公園や緑地として残された里山を対象に調査した。いずれも平均で20%を越す比較的高い水分が落葉に保持さ

れていることがわかった。落葉と並び林床の草本類にも注意が必要である。まず、シダ類は、枯死した葉がマット状に堆積し、長期乾燥状態が続くと火災に対して大変危険であるとされている。瀬戸内海沿岸地方の樹林地に多いといわれている。

里山林の防火性も、林床部の落葉や下草の堆積量とともに湿度（含水）が影響していることが分かる。

3.5 まとめ

間接的な効果も含めるなら全ての都市植生に効果が期待できる。ただし、より効果的に震災火災対策に役立てるためには、配慮と工夫が必要である。

第一には、配置が重要である。避難広場を保護するため外周を取り囲むように配置したり、延焼遮断帯にあっては広幅員道路や河川等の線的に連続したオープンスペースと一体的に存在する場合に効果を発揮する。特に木造密集地や工場等が立地している周辺は重点的に配置することが必要である。

第二には、輻射熱の遮断を効果的に行うためには、植栽帯の遮蔽性を高めること、有効な樹高を確保することが重要である。また、火の粉の侵入を防ぐためには、適当な空隙をとることで必要であると言われている。火の粉の性状については不明な点が多くどの程度の間隙間かについては今後の研究課題である。

第三には、耐火性、特に含水率に配慮が必要である。樹木の含水率を高めるため地域特性を踏まえた樹種選定や構成とともに、樹齢、気象、土壌、林床などに配慮して健全に管理することが重要となる。幾ら含水率の高い樹種を選んでも生育環境や管理が適切でないとう有効な機能は確保されていない。文字通りみずみずしく育てることが必要である。これは里山林防火でも同様で、落葉等の可燃物を蓄積させないこととともに林床部の含水率の制御が求められる。

かつての管理を行っていた古老の話によると伝統的に管理された里山林では、落葉や枯れ草は常に一定以下に保たれ、適度に湿潤に保たれていた

という。そのころは野火は少なかったともいう。こうした先人達の災害との戦いの経験の積み重ねに裏付けられた伝統的な管理手法を見直し、きちんと科学的な方法により検証してみる必要があると思う。

参考文献

- 1) 総務省消防庁・農林水産省林野庁：林野火災対策に係る調査研究報告書，275p.，2003
- 2) 岩河信文：都市における樹木の防火効果に関する研究，建築研究報告，No. 105，176p.，1984.
- 3) 前島康彦：東京都慰霊堂と横網町公園，東京大震災火災60周年を迎えて，東京都慰霊協会発行，pp. 1-8，1983.
- 4) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部自信被害調査中間報告書，723p.，1995.
- 5) 齊藤庸平：防災機能の向上，緑の環境設計，株エムジーティ，pp.197-203，2002.
- 6) 本木茂，山下邦博，後藤義明：森林の防火機能，(社)日本治山治水協会，68p.，1991.
- 7) 木村英夫，加藤一男：樹木の防火性に関する研究，造園雑誌 Vol. 11，No. 1，pp.11-15，1949
- 8) 石田真奈美，齊藤庸平：樹葉の接炎耐火性能に関する研究，日本造園学会関西支部大会研究発表要旨集，pp.53-54，2001
- 9) 齊藤庸平，岩河信文，中村克己：里山と防火，ランドスケープ研究66. 3，pp.195-198，2003.
- 10) 中村貞一：防火植栽の基礎的研究，京都大学農学部演習林報告26，pp.10-58，1956.

4. 溪畔林・河畔林の現地における機能評価

渡邊 康玄*

樹木が群で存在する場合には、流水に対して大きな抵抗となることから、治水上河道内の樹木は伐採管理されてきた。しかし、1980年代ごろから河川に対する国民の意識が変化し、うるおいやゆとりがより期待されるようになり、河川環境の保全再生といった見地から河畔林が捉えられるようになった。このような社会の変化の中で1997年（平成9年）には河川法が改正され、河川環境の整

* 寒地土木研究所寒地水圏研究グループ

備と保全が河川管理の目的として位置づけられた。

このような背景の下、河道内樹木に関する現地調査や水理模型実験さらには理論解析、数値解析等が盛んに行われ、流水の阻害といった問題点だけではなく、治水上の機能に関する知見が得られてきている。しかし従前は、河道内に生育する樹木は適正に管理伐採されるという前提に立っていたため、河川計画河道内には樹木が存在しない。したがって、河道内樹木に関する調査等については十分行われていたとはいえない状況であった。このため、河道内樹木に関する水理学的な挙動に関してさらに知見を蓄積していく必要があるが、河川環境や河道管理の観点からも、得られている知見を利用して河川計画に取り込まれてきている。なお、樹木を利用した治水工法としては、伝統的工法のひとつである「木流し」があるが、現在では、積極的に河畔林を治水に利用するといった動きも出てきている。ここでは具体的な事例を基に河道内樹木の機能について紹介するとともに、これからの課題等について述べることにする。

4.1 流水への抵抗

流れの中に樹木が存在する場合、樹木を単純な円柱で仮定すると次式で表される流速の2乗に比例する抵抗力が働く。

$$F = \frac{1}{2} \rho A C_d U^2 \quad (1)$$

ここで、 ρ ：流体の密度、 A ：樹木の流水中の投影面積、 C_d ：抗力係数、 U ：流速である。このため、樹木が存在する河道の流れを樹木が無い河道の流れと比較すると、同じ流量が流れた場合、流速が遅くなるとともに水位が高くなる。また、樹木は流れから同じ大きさの力を受けることとなるため、倒伏し流木となる場合も存在する。このような理由から、河川管理上、河道内の樹木は伐採されてきた。しかし一方で、この現象を積極的に利用して治水に役立てることも試みられている。なお、(1)式中の樹木の抵抗係数は、樹木が複雑

な形状を示していること、枝についている葉の影響も存在すること、流水中には枝がしなって流水に対する投影面積が変化することなど不確定要素が多数存在しており、現地での観測が重要となっている。

阿部ら¹⁾は、2005年8月の石狩川支川美唄川における出水時に、図4-1に示す位置において音響ドップラー多層流速計(ADCP)を搭載したラジコンボートにより樹木群内外の流速を測定している。図4-2は樹木群内外における流下方向流速の観測結果の一例である。樹木群の流水阻害の程度が大きいことがわかる。また、観測結果の解析により樹木群の影響が樹木が無い部分の流速にも大きく影響していることも指摘している。



図4-1 美唄川における樹木群内外の流速測定箇所

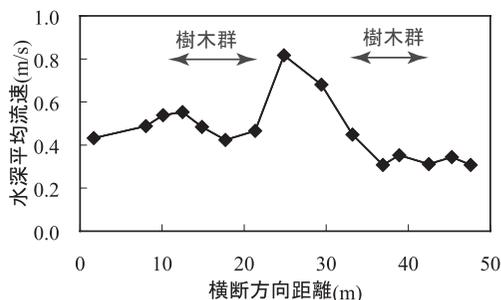


図4-2 樹木群内外の流速測定結果

4.2 河畔林を用いた治水

河畔林により流速が低減され流れの向きが変化することや、その結果土砂が堆積することを治水に利用する試みが行われている。また、河畔林の存在により、河岸浸食の低減効果も報告されている。以下では、河畔林の治水への利用の具体的な事例を紹介する。

(1) 木流し

堤防表面に接する流れを葉の付いた樹木で弱め、勢いのある流れによって堤防が浸食を受けることを防ぐ伝統工法である。具体的には、洪水時堤防が危険であると判断された場合、図4-3に示すように堤防周辺に生育している樹木を根元から伐採し、枝に土嚢の錘をつけるとともに根元を鉄線で縛り堤防に固定し、水面下の堤防表面に投げ入れるものである。

(2) 河畔林を用いた水制工

水制工とは、川の中に突起状の構造物を配置し川の流れの方向を変えたり弱めたりするものである。河道内に生育する河畔林に水制工の役割を持たせようという試みが福岡ら²⁾によって米代川などで行われている。高水敷に生育する河畔林を櫛の歯状に伐採し、流水が集中して河岸へ向かわないようにする試みである。平成8～12年度に米代川水系米代川では、鶴形(13.0km)、蟹沢(39.0km)の2地区において、試験が実施されている。その結果、洪水時に一部倒伏等が存在するが、樹林帯内やその周辺に土砂の堆積が認められるとともに、流れを制御する効果が確認された²⁾。図4-4に米代川における水制状に河畔林伐採を伐採した際の平面図を示す。突起部の長さや間隔等は、室内水理実験等で得られている知見を基に決定されている²⁾が、この現地試験によりこれらの知見が、現地においても有効であることが示された。

しかし、樹木は生長するものであり、かつ柳等の河畔林は生育範囲を広げる速度も速いため、水制工の形状に維持管理することが必要不可欠となる。また、水制工はその直上流部が大きく洗堀さ

れるため、樹木が根ごと流出する場合も存在する。この様なことから、実際に行う場合には、維持管理も含めて、計画立案される必要がある。

(3) 緑の砂防ゾーン

土砂の捕捉という観点から砂防事業に取り入れられる事例もある。

土砂災害防止のために砂防ダム等が建設されるが、建設が困難なために土砂の生産、流出を十分に抑制、調節できない場合には、土砂の堆積する空間が設けられる。その場合、土砂の捕捉効果を高めるとともに流木の捕捉のために、そこに存在



図4-3 木流し工の実施風景
(北海道開発局提供)

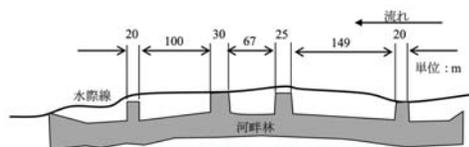


図4-4 米代川における柳水制
(写真：国土交通省の能代河川国道事務所提供)

する樹木を利用するもしくは新しく樹木を導入する計画が立てられる。このような空間を緑の砂防ゾーンと呼び全国各地で事業が実施されている。図4-5は、北海道の十勝川支川戸蔦別川における緑の砂防ゾーン箇所航空写真である。床止め工の上下流に積極的に植栽を行い、土砂の扞止効果を期待したものである。数値シミュレーションや現地踏査等が詳細に行われて計画され、植栽は平成3年度から17年度までに296,000m²行われている。しかし、現在まで比較的大きな出水が生じていないため、この箇所での有効性は現段階では確認されていない。

土砂の堆積は、樹木の根の位置が相対的に地表面から深くなることを意味し、枯死することもある。このため、土砂の捕捉効果を期待する場合には、不定根を伸ばす樹種を選択するなど、注意を要する。また、外来種はもちろんその地域に自生しない種を選択することは、自然環境上も問題がある。

(4) 河岸侵食抑制効果³⁾

北海道東部の標津川では、蛇行した旧川を利用して直線化された河道の蛇行復元事業が進められ



図4-5 戸蔦別川の緑の砂防ゾーン
(北海道開発局帯広開発建設部提供)

ている。試験的に通水された箇所において、人工的に掘削された区間と旧川河道をそのまま利用した区間とでは、河岸の浸食の程度が大きく異なることが確認されている³⁾。図4-6は、蛇行部に通水されてから、3ヵ月後の状況を撮影したものである。旧川区間は通常時の水際まで植生に覆われている。一方、人工的に掘削された区間は植生の自然復元を目的として裸地のままとされた。この区間の河岸線の変遷を示したものが図4-7であるが、植生で覆われた旧川区間と裸地の人工掘削区間とでは、浸食の程度が大きく異なっていることがわかる。土壌の人工的な攪乱等の影響もあると考えられるが、植生の河岸侵食抑制効果はきわめ



図4-6 標津川蛇行復元試験区の通水から3ヵ月後の状況

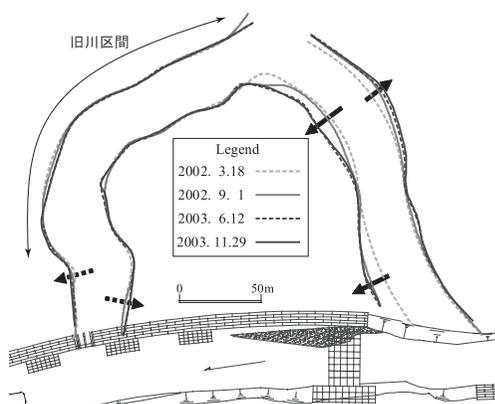


図4-7 河岸線の変遷

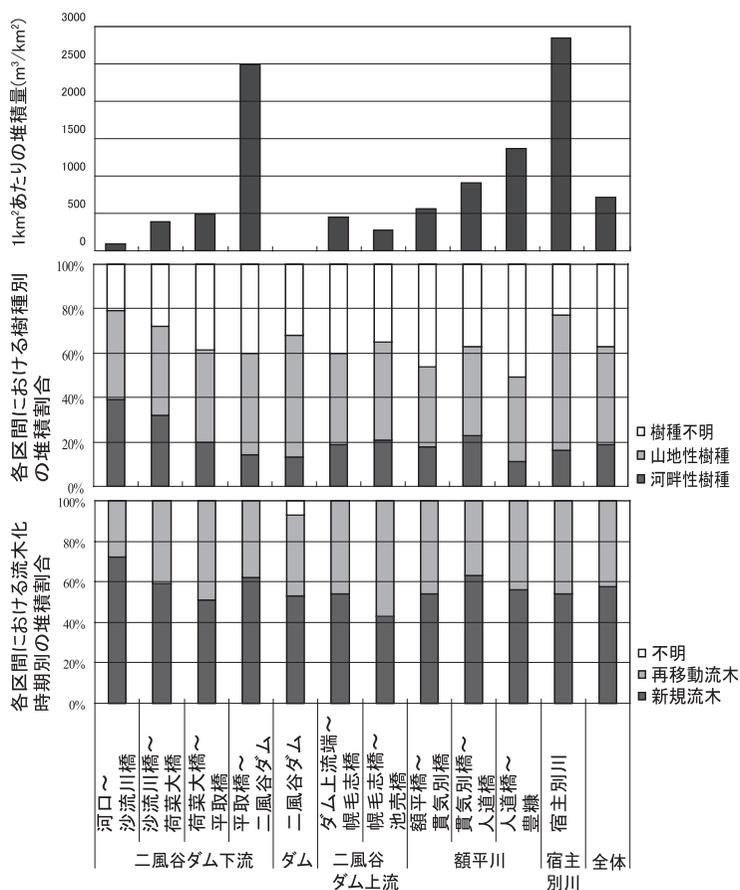


図4-10 沙流川における流木調査結果

堆積量については、各区間の延長および河道面積がまちまちであるため、河道区間1 km²あたりの堆積量としている。調査範囲内には約8,600 m³の流木が堆積していた⁴⁾が、上流側になるに従い堆積量が増える傾向があることがわかる。なお、平取橋～二風谷ダム間で堆積量が多くなっているのは、ダム直下に大きな中州があり、その中州の堆積量が約1,000 m³であったためであり、中州の流木捕捉効果も確認された⁴⁾。

流木の樹種については沙流川流域で主に山地部に生育する樹種を山地性、主に河川林として生育している樹種を河川性樹種としてまとめられている。調査区間を通して相対的に山地性樹種が若干多い割合を示している。しかしながら、ダム下流

域において、可搬性の樹種の割合が増加しており、この区間では河川林が流木となっていることが確認できる。

さらに、図4-10には今回の洪水で流木化したものか、以前の洪水で流木化したものが今回の洪水で再度流下したものを、流木の朽ち状況から判断して区別した結果も合わせて示している。区間を通して新規に流木になったと判断されるものが多いという結果が得られている。

(2) 流木の堆積場所

河川性の流木が相対的に多い、河口から二風谷ダム下流までの21.4km 区間について、流木の堆積場所の割合を示したものを図4-11に示す。流

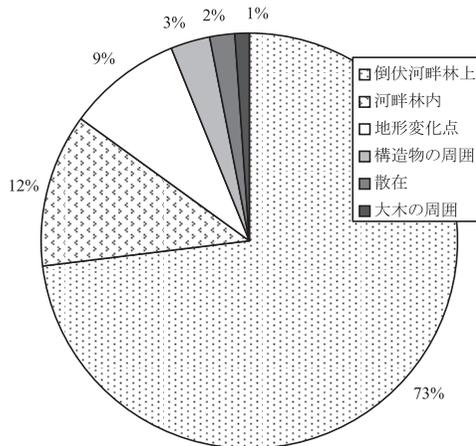


図4-11 流木の堆積箇所

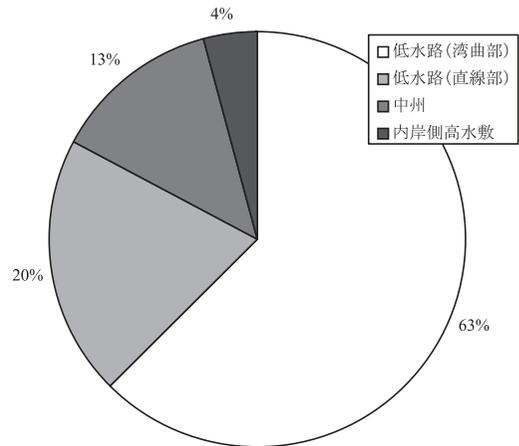


図4-12 河畔林の流木化箇所

木の85%が倒伏した河畔林と河畔林内で捕捉されていることが示されており、河畔林の重要な役割の一端が示されている。図4-13は流木が堆積していた場所の典型例を示したものである。

今回の沙流川の調査では、湾曲部内岸側の砂州上に生育する河畔林が流木捕捉に寄与したが、樹林の河道における位置と流木の捕捉の関係については十分理解されていない。河畔林の治水上の効果として流木の捕捉を考える場合には、河畔林が流水の流下を阻害することも踏まえて、この点を明確にしていく必要がある。

(3) 河畔林の流木化

河畔林が流木を捕捉する一方で、河畔林が流木化することとも言われていることから、同様に河口から二風谷ダム下流までの間で、洪水前後の航空写真および現地踏査から河畔林が流失した量の推定が行われている⁴⁾。この区間の河畔林のうち、281.8m³が流失していることが確認された。河畔林が流木として発生した箇所別の発生割合を示したものが図4-12である。低水路沿いの河畔林が80%以上を占めていることが分かる。また、この区間の河畔林の量(材積)は5230m³(流出した分を含む)となっており、流出量の占める割合は、全河畔林の内の5%程度である。なお、図4-14は、河畔林が流木化した箇所の典型的な例であ

る。

河畔林の倒伏は、図にも示されているように、樹木そのものに流体力がかかり引き倒された場合(図中①)と、根もとの土壌が浸食により倒伏流失した場合(図中の②)とに分けられる。前者に関しては次節で述べるような調査が行われてきており、流れと倒伏の関係が整理されてきている。また、後者に関しては、河道の変化とも合わせて検討が行われる必要があり、樹木による倒伏状況のより正確な把握と検討が必要となっている。

(4) 河畔林と流木との関係

河口から二風谷ダム下流までの21.4km区間について、河畔林が流木を捕捉した量が3420m³であったのに対し、河畔林自身が流木化した量はその1オーダー少ない300m³に満たない量であった⁴⁾。

今回の洪水におけるこの区間の河畔林は、自身が流木化するよりもはるかに大量の流木を捕捉していたといえる。流木の流下形態についても不明な点が多々あるが、この効果が普遍的なものかどうかさらに事例の追加が必要となっている。

4.4 河畔林の倒伏

河畔林に治水効果を期待する場合に、流木化して悪影響を与える場合もあるため、どの程度までの流れに耐えることができるかが重要な点であ



図4-13 沙流川における河畔林の流木捕捉状況



図4-14 沙流川における河畔林の流木化状況

る。このことから、従来より、様々な地点で樹木の倒伏限界を知るための調査が行われてきている^{5,6)}。

図4-15は、これらの結果をまとめたもの⁶⁾であるが、この図と4.1で述べた流水と流体力との関係から対象とする洪水に対し、生育している樹木

が倒伏するか否かが判断できる。しかし前述したように、根元が洗堀を受けて倒伏するような状況や流水により樹木が振動して根元が緩むなど洪水中の河畔林の挙動や倒伏機構は未だ十分解明されておらず、今後樹木の倒伏メカニズムの理解が必要である。

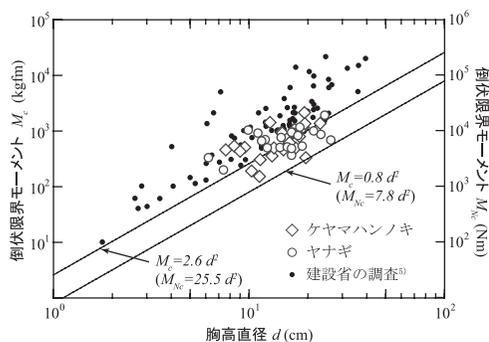


図4-15 河畔林の倒伏限界試験結果⁶⁾

4.5 まとめ

従来河畔林は、流水の阻害となるとともに流木化して構造物等に被害を与え、災害の引き金になるといわれてきた。近年の集中豪雨に伴う災害の発生も流木が大きく関与している。しかし一方で、流木を捕捉する機能が具体的に示されるとともに、流水の阻害という従来治水にとってマイナスの機能を治水に積極的に利用する試みを実施される事例が多数報告されてきている。自然環境と治水の両立を図るため、自然環境面での河畔林の持つ機能とともに、今後ますます治水面の機能についても適正に評価される必要がある。なお、治水面の機能を積極的に利用する場合には、その限界についても十分に検討されなければならない。

参考文献

- 1) 阿部修也・渡邊康玄・桑村貴志：2005年美唄川出水の樹木群落を含む流速鉛直分布の観測，土木学会水工学論文集，第50巻，pp.1147-1152，2006年2月
- 2) 福岡捷二，樺沢孝人，齋藤潤一，布施泰治，渡辺昭英，大橋正嗣：柳水制の試験施工とその機能の現地調査，土木学会水工学論文集，第42巻，pp.445-450，1998年2月。
- 3) 渡邊康玄，長谷川和義，森明巨，鈴木優一：標津川蛇行復元における2way 河道の流況と河道変化，応用生態学会応用生態工学，7(2)，pp.151-164，2005。
- 4) 平成15年度台風10号北海道豪雨災害調査団報告

書，土木学会水工学委員会，2004。

- 5) 河川における樹木管理の手引き，リバーフロント整備センター編集，山海堂，1999。
- 6) 渡邊康玄，市川嘉輝，井出康郎：洪水時における河道内倒伏限界，土木学会水工学論文集，第40巻，pp.169-174，1996年2月。

5. 森林植生の長期変化と山地防災

鈴木 雅一*

5.1 はじめに

数十年という時間を隔てると国土は大きい変貌をみせる。この変化は、都市部に限ったことではなく森林も様々に変化している。しかし森林の変化について、これまであまり説明されてこなかった。森林の長期的な変化は、自然災害（特に山地で発生する土砂災害）の発生にも大きく影響を与えている。ここでは、日本における最近100年から50年間の森林の変化を紹介し、その変化が山地で発生する土砂災害とどのように関係しているかを見ていく。

5.2 日本の土地利用変化と森林

日本の森林面積は国土の約2/3で、世界平均から見ると森林が豊かな国ということになる。それでは、日本の森林面積はどのように移り変わっているのだろうか。「この100年間でみると、日本の森林面積はほとんど変わっていない。」という話を講義ですると、多くの学生が不思議そうな顔をする。「日本の森林面積はどんどん減っているのに違う」と思っている人が多い。都市、市街地の拡大と農地開発は著しく進んでいるし、ゴルフ場もたくさん造られた。しかし各種の資料は、この100年間でみると、日本の森林面積はほとんど変わっていないことを示している。

最近100年間の土地利用変化を最も客観的に示す資料は、国土地理院の5万分の1地図である。明治中期から大正前期にかけて、陸地測量部によって全国の地図が作成された。この地図にも現在の国土地理院作成の地図に示されているように、針葉樹林、広葉樹林、果樹園、桑畑などの記号で、土地利用の情報が記載されている。これに

* 東京大学大学院農学生命科学研究科

よって、ちょうど100年前つまり1900年ころの土地利用を全国的に知ることができる。

北海道教育大学の氷見山教授らは、全国についてこれを国土数値情報の標準グリッドに対応させて入力したデータセットを作成しており、1940年前後と1985年時点の5万分の1地図についても同様の作業によるデータが作成され、その集計結果を報告している(氷見山, 1992)。

この集計によると、森林面積はほぼ国土の2/3でほとんど変わらず、農地の割合もほぼ17パーセント程度で一定とみてよい。変化が大きいのは、都市・集落の増加と荒地の減少である。都市・集落の区分は、1.69パーセントから4.99パーセントへと増加し、荒地は10.86パーセントが3.20パーセントへと減少している。なお、「荒地」という区分は、5万分の1地図の「荒地マーク」の部分で、いわゆるハゲ山、原野、採草地などに対応する。

ただし、この結果からは農地が開発されたり、都市の拡大で減少したはずの森林の行方がよくわからない。そこで筆者らは、このデータと国土数値情報の標高データを用いて、土地の傾斜別に森林面積の変遷を集計した。1 km 間隔の標高データから土地の傾斜を求め、氷見山(1992)の作成した1900年、1940年、1985年頃の土地利用データと対比したところ、次のことがわかった。

- 1) 国土を傾斜によって5段階に区分して集計すると、一番緩い傾斜区分(平坦地)において都市と農地が増加し、森林は大幅に減少している。
- 2) 傾斜による区分の残りの4段階(いずれも傾斜地)では、都市化、農地の増加はほとんど見られず、平坦地における森林の減少とほぼ等しい森林面積の増加が、これらの区分で見られる。
- 3) 傾斜地での森林面積が増加に対応して、「荒地」と区分されていた面積が減少している。

以上より、平坦地(平野部)で都市が農地に広がった分、森林が農地化されるという、玉突き状の土地利用変化が着実に進む一方で、1900年時点には広く存在していた荒地が森林化して、この

100年間ほぼ変動のない森林面積が保たれてきたことが説明できる。森林面積はほとんど変わっていないが、そのうち約1割は場所が変わっていたのである(鈴木, 2004)。

この結果は、日本の森林について、土地利用が安定的で変化が少ないために森林面積が一定だったのではなく、土地利用のダイナミックな変化の中で、傾斜地における「荒地」の森林化が伴って結果的に森林面積がほぼ一定に保たれてきた、と理解すべきことを示している。「荒地」の森林化について、ハゲ山を復旧する治山事業はその重要な一部を構成しているが、従来貧弱な植生のところに積極的に植栽を進める広範な活動の結果と考えられる。

5.3 人工林の動態

現在「森林が劣化している」と憂慮される問題点はどこにあるのだろうか。「森林が劣化している」と気遣われる理由を列挙すると、1) 原生的自然の減少、および大径木の減少、2) 都市化などによる身近な自然の減少、3) 環境悪化による森林衰退、4) 手入れの十分でない人工林の増加、などがあげられる。この他にも、野生動物が保護の結果として増加したことにより樹木が傷み森の健全性が危惧される地域が生じているなどの問題などもある。これらは、いずれも森林の質的な劣化で、単に面積変化のみでは論じられない。

そこで、日本の森林面積の約4割を占めている人工林について、その林齢別の面積を示す(図5-1)。日本では森林は伐採されるとほとんどの場合数年以内に植林されてきたので、人工林の林齢別面積には数十年にわたる森林変化の情報が含まれているからである。

図5-1は、1981年と2002年の人工林の林齢構成である。人工林面積は、1981年9.9万 km^2 、2002年10.3万 km^2 と微増であるが、最近数十年間に人工林の林齢構成は大きく変わっている。この図は、「人口ピラミッド」と同様に読み取ることができよう。人口動態での死亡は「森林伐採」に、出生は「植林」に対応する。1970年代前半までの「拡大造林」期の大面積伐採と植林が、人工林の団

塊の世代を作っている。また、近年はほとんど伐採されず植林面積も少ないので、若齢林が減少し、高齢林が増加するという「少子高齢化」も約20年を隔てた林齢構成の変化から読み取ることができる。植林面積の減少は、「植える意欲がない」のではなく、「木材価格の低迷で伐採量が減少し、新規に植えるところがない」という因果関係と考えられる（なお、抜き伐りした材木が供給されるので、図5-1で新規に伐採された森林面積が少なくても、ある程度の木材供給はされている）。

図5-1のような林齢構成の変化は、森林の管理に様々な問題を引き起こしている。その一つが、手入れの遅れた人工林問題である。団塊を構成する35年から45年前に植林された広い面積の森林で、山村の過疎化とともに人工林の手入れ不足が生じている。これら人工林の適切な管理と有効活用が重要な課題となっているのである。しかし一方で人工林の林齢の増加は、年々の森林の成長によりかつてないレベルに森林蓄積量(バイオマス)を増加させている。

5.4 植生変化がもたらす土砂災害発生の変化

(1) 土砂災害形態の変化

人工林の林齢構成の変化が、土砂災害発生に大きく関わっていることに気づかれたのは、1990年代に入った頃からであった。1982年の長崎災害、1983年島根災害の頃まで、豪雨による山地災害は多数の表層崩壊を伴う事例が多かったが、その後は表層崩壊の集中発生する事例が少なくなったこ

とが気づかれたのである。

表層崩壊が集中発生した典型的事例として、写真5-1に1953年8月の南山城災害における京都府と滋賀県境の航空写真を示した。表層崩壊発生の頻度は、写真下半分の京都府和東川流域と上側の滋賀県信楽町（現在は甲賀市）の区域で異なり、和東川流域ではほとんどの0次谷で表層崩壊の発生が見られる。1980年代の初めまで、豪雨があるときのように表層崩壊が集中して発生する事例が頻繁に生じていた。写真5-1の範囲において府県境を境に地形、地質に差異はない一方で、航空写真より和東川流域の植生は森林伐採からあまり年数が経過していない植生であることが示され、この斜面崩壊発生頻度の差異は、「植生が貧弱なところで表層崩壊発生が多い」という植生状況との対応が指摘できる。

このような植生と表層崩壊との対応関係は、塚本(1998)の表7.1にまとめられているように各地で指摘され、現在では広く受け入れられている理解である。その具体的内容は、「伐採以前の樹木根系が腐朽し弱くなり、また新たに生育した植生が樹木根系の強度が十分でない伐採後5年から20年(15年とするものもある)の間は斜面崩壊が生じやすい」というものである。

さて、ここであらためて図5-1の左図をみると、1980年代前半の林齢構成は20年より若い人工林が大半を占めていることがわかる。この頃の人工林は表層崩壊の発生しやすい森林が多くあったことになる。近年、表層崩壊の多発が減少してい

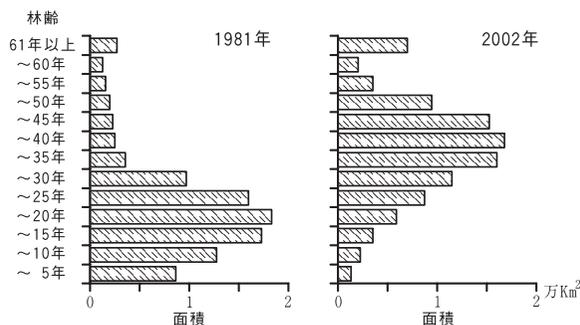


図5-1 人工林の林齢別面積 (林野庁編, 2005より図化)
左: 1981年, 右: 2002年

る理由として、図5-1右図に示されているように若齢林の減少が考えられている。かつて広い面積を占めていた若齢林が成長し、樹木根系が強くなって全国的に表層崩壊発生が生じにくくなっているとする理解である。

しかし、「毎年の報道を見ていると、とても土砂災害が減少しているとはいえない。」と考える方も多くあると思われる。写真5-1に示されるような多発する斜面崩壊は、樹木根系が斜面崩壊に関係する「表層崩壊」であり、これとは別に「深層崩壊」がある。樹木根系が密に存在するのは地表から1 m内外であり、地上の森林の状態がほとんど関係しない「深層崩壊」は以前と変わらず発生しているのである。写真5-2に「深層崩壊」の典型的事例として、1969年黒部川上流の廊下沢崩壊を示した。「深層崩壊」は一箇所といえども土砂量が多く、対応に困難が多く、被害も大きくなりやすい。1997年針原川土石流災害、2003年水俣土石流災害や2004年に宮崎県の各地で発生した土砂災害の多くは、「深層崩壊」に区分される。

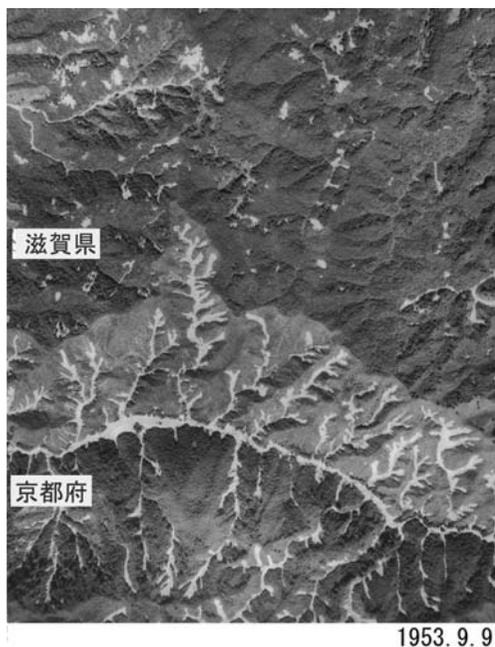


写真5-1 表層崩壊多発の事例 (1953年南山城災害, 鈴木 2006)

しかし、かつて多発していた「表層崩壊」の減少は確実に土砂災害被害発生数の減少に寄与していると考えられている。土砂災害形態の変遷は、塚本 (2006) にも詳述されている。

(2) 土砂災害被害の長期的動向

2004年、2005年は度重なる台風の上陸で、多くの災害が発生した。防災、減災の努力が様々な場面で指摘されたところであるが、少し長い目で土砂災害の動向を考えてみよう。図5-2に気象災害



写真5-2 深層崩壊の事例 (1969年発生) の黒部川上流廊下沢, 1977年撮影, 鈴木 2001)

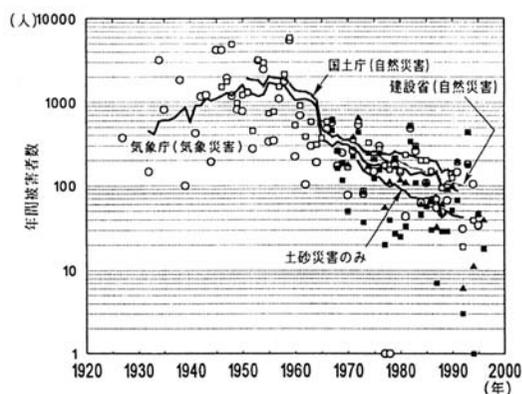


図5-2 自然災害・気象災害と土砂災害による死者・行方不明者数の経年的動向 (折れ線は10年移動平均, 沼本ら 1999)
 ○ 気象庁 (気象災害) : 理科年表/気象災害年表
 □ 国土庁 (自然災害) : 防災白書
 ▲ 国交省 (自然災害) : 土砂災害の実態
 ■ 土砂災害 : 土砂災害の実態

と土砂災害の被害者数の推移を示した。災害統計は目的に応じて各種作成されているので、その幾つかを図示している。「気象災害」は主に豪雨による洪水災害と土砂災害で、「自然災害」の定義はもう少し広い。この図の「自然災害」に含まれる地震災害については、地震による土砂災害被害は含むが、家屋倒壊などによるその他の地震被害は除外して集計している。この図において年々の値は変動するが、図中の線は前後5年間をあわせた10年移動平均値で、明瞭な被害者数の減少傾向がわかる。図5-2における移動平均値を数字で示すと、気象災害被害者数は1950年代の1000人超/年、1960年代後半約300人/年、1990年約100人/年という変化である。また、1960年代後半以降に統計値が得られる土石流、がけ崩れなど土砂災害による死者、行方不明者数の移動平均値は、1972年191人/年、1982年72人/年、1992年42人/年という変化をしている（沼本ら、1999）。

図5-2を見ていると、被害者数の経時的な減少とともに1950年代の人的被害が大きいことであらためて気づく。例えば、1953年を大災害の年と認識している人は少ないが、400人以上の死者が生じた災害が4回あった（うち2回は1000人以上）。個別的に述べると、1953年6月23日から6月30日にかけて梅雨前線により熊本など九州を中心に死者行方不明者1013名が発生した「西日本豪雨災害」、7月16日から7月18日の豪雨により和歌山県南部で死者行方不明者1124名が発生した「有田川、日高川災害（南紀豪雨）」、8月14日から8月15日に死者行方不明者430名が発生した「南山城災害」、9月22日から9月26日に愛知、三重、京都、滋賀、大阪などで死者行方不明者478名が発生した「台風13号災害」と4度の大きい災害が繰り返された（死者行方不明者数は、消防庁編2002「消防白書」による）。このように大きい被害の発生は近年では生じておらず、多くの台風が上陸した2004年の風水害による死者行方不明者数は、暴風による海難によるものを含めて236名であり、一桁以上異なる。

1950年代以降河川堤防の強化が図られ、その後の被害者数減少に結びついていく。1970年当時、

「大河川の洪水災害が減少し自然災害被害者数は減少してきたが、山地の土砂災害被害者数に減少は見られないため、全被害者に占める土砂災害被害者の割合はむしろ増加し、土砂災害対策の重要性は増加している。」といわれた。この点についてその後の変化を集計すると、気象災害被害者数に占める土砂災害被害者数の割合は1970年代に約2/3であったが、1980年代以降は約2/5に減少した。1980年代以降、「土砂災害被害者数は、割合としても低下している」という結果である。

土砂災害被害者数の減少には、1) 気象予報、情報伝達の進歩と防災意識の向上、2) 治山、砂防など防災工事の進捗、3) 伐採跡地、若齢林の減少による根系崩壊防止機能の向上、などが複合して働いていると見られる。近年、気候変動の影響で大雨が降りやすくなっているという指摘や、前述の手入れの遅れた人工林の増加が土砂災害を増加させる懸念が指摘されているが、現在のところ土砂災害発生にその影響は顕著には現れていないようである。むしろ以前より大量で強い雨が降っても、1970年代やそれ以前に見られたような激甚な土砂災害は発生することが少なくなっており、伐採が減って若齢林が減少し、植栽後20年を越えた森林が増えていることによって斜面表層崩壊の発生危険度を低下させている効果が発揮されていると考えるのが妥当である。

現在、土砂災害の被害を更に減らすために「深層崩壊」予測の重要性が増しているが、場所と時期の予測の両面で困難が大きい。基礎研究の蓄積とともに、避難警戒などの対応による減災が取り組まれているところである（地頭蘭ら、2006）。

5.5 新たな土砂流出形態の発生と対応

近年現れてきた問題に、林内の土壌侵食問題がある。手入れの遅れた人工林で、暗い林内の下層植生が衰退し、外から見ると樹冠に覆われた森林なのだが、地表は土壌がむき出しになっていて表面侵食が発生するのである。この現象は、特に地表に落葉が貯まりにくいヒノキ人工林で顕著に生じている。また、ニホンジカなどの大型野生動物の増加による下草採食の結果、ブナ林などの自然

林でも林床の土壤浸食問題が発生するようになった(石川ら, 2006)。未だ限られた観測事例ではあるが, 林床に下層植生や落葉の被覆がないとき, ハゲ山における表面侵食量に匹敵する1年に10mmに及ぶ土壤浸食が観測されており, 土壤流出防止対策が必要となってきた。

河川の防災構造物と溪流生態系の調和を図るといった課題を別にすると, 従来, 野生生物管理といった課題について自然災害科学と接点があるという認識は乏しかったが, 山地を含む流域管理という視点から見ると両者はかなり近接した研究領域になってきた。野生動物の動態も含んで変化している森林の自然環境は, 水の循環と土砂の動態に直接影響を与えており, 長期的視点に立った森林管理の必要性が増している。自然災害科学, 森林科学のどちらにとっても, これまで以上に学際的な対応が必要になっているといえよう。

本稿で述べたことを要約すると, 「山地の土砂災害の動向を把握する上で, 森林の質に立ち入った長期的な植生変化の理解が欠かせない」ということになるが, 数十年という時間軸をとると人工林林齢構成の変化に見られるように, 一般に考えられている以上に「森林が変貌している」ことが認識されるようになったのである。

引用文献

- 氷見山幸夫編：日本の近代化と土地利用変化。文部省科学研究費重点領域（近代化と環境変化）報告書, 57p., 1992.
- 石川芳治・白木克繁・戸田浩人・宮貴大・鈴木雅一・内山佳美：丹沢堂平地区における土壤侵食と緊急対策, 神奈川県自然環境保全センター報告, 3, pp. 62-70, 2006.
- 地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳：深層崩壊発生場予測法の提案－鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして－, 砂防学会誌, 59(2), pp. 5-12, 2006.
- 沼本晋也・鈴木雅一・太田猛彦：日本における最近50年間の土砂災害被害者数の減少傾向, 砂防学会誌, 51(6), pp. 3-12, 1999.
- 林野庁編：森林・林業統計要覧（時系列版）2005, 林野弘済会, 148p., 2005.
- 鈴木雅一：黒部川上流, 廊下沢崩壊地の推移－航空写真を用いた崩壊発生後25年間の変化の検討－, 砂防学会誌, 54(2), pp. 13-18, 2001.
- 鈴木雅一：日本の森は減っているか－明治以降の森林面積の推移－, 井上真・酒井秀夫・下村彰男・白石則彦・鈴木雅一著「人と森の環境学」, pp. 11-19, 東京大学出版会, 2004.
- 鈴木雅一：1953年8月「南山城災害」斜面崩壊地の航空写真についての研究, 砂防学会誌, 59(4), pp. 38-42, 2006.
- 塚本良則：森林・水・土の保全－湿潤変動帯の水文地形学－, 朝倉書店, 138p., 1998.
- 塚本良則：日本の土砂災害と対策の歴史, 森林科学, 47, pp. 4-9, 2006.