論　文

安全・安心な都市空間形成を目指して
～都市域を水災害から守るために～

中山　　学[1)]

要　約

大都市への人口集中が進み，多くの人々は快適で，文化的な生活を享受している．しかし，近年，記録的短時間降雨の発生頻度が増加しており，下水道による雨水排水能力を超えた内水氾濫や中小河川の疎通能力を超えた外水氾濫が発生している．本稿は，過去から現在までの水災害を概観し，大規模地下街を含めた地下空間を対象として，主に内水氾濫における地下空間の浸水に対する脆弱性と避難困難度について述べたものである．

Key words：記録的短時間大雨，内水氾濫，外水氾濫，都市型水害

1．はじめに

大都市への人口集中が進み，地方の過疎化は拍車がかかり，首都圏をはじめとする三大都市圏への人口流入が顕著になっている．その結果，都市部で生活している多くの人々は，快適で文化的な生活を享受している．

しかし，近年，地球規模で進む気候の極端化とヒートアイランド現象に伴って，東京などの大都市でも記録的な豪雨による被害は発生している．特に，大都市で浸水が発生した場合に最も注意しなければならないのが「地下空間」である．浸水が深刻化すれば人命に関わる事態にまで至る可能性が潜在しているからである．

豪雨に対して都市を守るためのインフラとして「下水道と都市河川」が整備されてきた．しかし，設計強度である50 mm/hrを超える強い雨に対してまで有効ではない．

気候変動の影響にヒートアイランド現象も関係して，最近では，都市部を中心に局地的に非常に激しい雨が降る．このうち，狭い範囲で短時間に降る猛烈な雨は「ゲリラ豪雨」ともよばれており，予測が大変難しい．激しい集中豪雨によって，都市河川流域では瞬く間に氾濫がひき起こされる．氾濫水は道路を水路のように流下し，さらに地下空間にも流入する．また，氾濫にはいたらなくても，河川の急な水位の上昇による思わぬ事故も発生する．ここでは，頻発する短時間豪雨がもたらす都市水害の特徴を観るとともに，今後望まれる対策について考えることとする．

2．研究の背景

「都市域を水害から守る」について検討するにあたり，まず人々はどのように水と戦ってきたか，現在はどのような災害が発生しているかについて述べる．

[1)] 神戸学院大学現代社会学部社会防災学科

2-1　水との戦いの歴史

「水との闘い」は，狩猟から稲作による生活に変わった時から始まったと言われている．当初は，小川の流れを柵でせき止め，溝を使って田に水を引く利水を目的とし，洪水は天災として避けがたいものであった．その後，国家の統一が進み，難波京・平城京・平安京などの古都や，その周辺地域を流域とする淀川水系で，さまざまな水害対策が行われ始めた．

5世紀の仁徳天皇による茨田堤や秦氏による葛野大堰築造，鎌倉時代以降は，政治の中心は関東地方にも拡大し，「多摩川堰」「利根川築堤」などの治水事業が行われるようになった．戦国時代には甲斐地方では武田信玄の「信玄堤」，近畿圏では秀吉による宇治川と巨椋池の分離や築堤などの大河川を対象として治水事業が行われ，その後の江戸時代まで続いた．

江戸時代以前の伝統的治水技術は，水の勢いを抑えて被害を軽減するという「減勢治水」の考え方に基づいた技術で，河川の氾濫や浸水をある程度許すことにより，結果的に生態系など，環境への影響を小さくするものであった．伝統的治水技術には，その技術を持っている「人」，水害防備林や水制工などの施設としての「物」，および言い伝えや祭りなどとして受け継がれている「知恵」が含まれる．地域で対応する広い視野から，複数の対策が組み合わされている場合もあり，地域特性を考慮した方策が用いられていた．このような伝統的な水害対策は全国各地に見られる．

近世以降の河川工事は，水害対策として現在もその機能を果たしており，治水の根幹をなしている．明治になると，欧米先進技術が導入されるとともに，近代技術を用いた治水事業が行われ，「水との闘い」は，住民の手から行政の手へと移った．その結果，水の危険性を知ることや被害を防止・軽減する知恵が失われ，防災意識の低下にもつながったとも言えるかもしれない．

複数の蔵が階段状に連なった「段蔵」は，床の高さが異なる．浸水の深さに応じて濡れると困るものをより高い蔵に収納するようにして，被害軽減の工夫がなされている．床の高さは，水がたまるような地形では2～3 mと高く，床下浸水程度の被害が多い地区では1～2 m程度となっている．これらは先人の知恵であり，川と共存して暮らしてきた住民が自衛手段として行ってきた水害対策であり，個人の資産を守るだけではなく，地域住民の避難場所でもあったと考えられる．すなわち，河川の氾濫・浸水を想定したものであり，その被害を軽減することに重点が置かれ，「ある程度被害を防ぐ」「氾濫・浸水を遅らせる」「家屋に浸水する濁水を浄化する」という考えに基づいている．伝統的な水害対策は，「段蔵」や「輪中堤」などが知られている．しかし，「物」だけでなく，「人」や「知恵」など現在でも有効と考えられるものもある．その多くは，「河川対策」と「流域対策」を組み合わせたものであり，現代の総合治水対策と同様の考え方に基づいているといえる．

写真-2.1　現存する「段蔵」

2-2　台風および高潮による災害

日本列島への台風の上陸数は，図-2.1のように推移している．1960年代までは気象災害による死者，負傷者の最大の原因は台風であった．しかし，伊勢湾台風の後に災害対策基本法が制定され，防災のためのインフラストラクチャーの整備に伴い，事前予測が可能な台風の被害は減少し，現在に至っている．

台風とは，直径が数百kmほどの大気の渦で，気圧の低い中心に向かって周りから風が吹き込み激しく上昇するので，中心域で強い風と雨をもたらす．

台風のエネルギーの源は，熱帯・亜熱帯域の海水に貯えられた大量の太陽熱で．この熱が大気を温めて上昇させ，風を呼び込み，しだいに大きな渦に成長して台風となる．

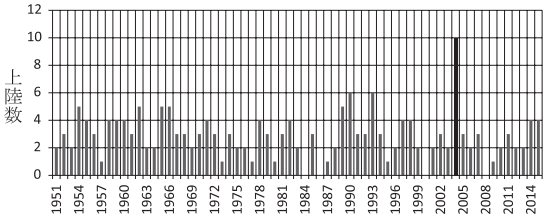

図-2.1　台風の上陸数の経緯

北半球における大洋の中・低緯度域では，地球が東向きに自転していることによって生ずる力（コリオリ力）が働き時計回りの海流が流れるので，大洋の西部では，海流は低緯度から高緯度へ向って暖流が流れる．このため大洋西部域では，より高緯度まで海水温度が高くなるので，熱帯低気圧が多く発生し，移動しながら成長を続けることになる．

熱帯低気圧のうち，黒潮が流れる太平洋西部とメキシコ湾流が流れる大西洋西部域が世界における2大発生域である．前者を台風，後者をハリケーンと呼んでいる．日本列島には，太平洋西部海域（主としてフィリピン東方海域）で発生した台風が，暖かい黒潮に沿って勢力を維持･拡大しながら北上して来襲する．

中心に向かう気圧の傾きが大きいほど風は強くなるので，一般に中心気圧の低い台風は「強く」なる．観測された最低の気圧は，1934年の室戸台風（死者数3,036）の911.6 hPaである．主被災地の京阪神地方には不意打ちの状態で襲来し，被害を拡大したので，台風予報の向上をうながす契機となった．

写真-2.2　伊勢湾台風　被害状況

最大の台風災害は1959年の伊勢湾台風によるもので，伊勢湾に発生した観測史上最大の高潮などにより死者数5,040などの著しい被害が生じた．

この伊勢湾台風による災害時に顕著になった高潮は，台風に伴って，「気圧低下による吸い上げ」と「風による吹き寄せ」により海面が上昇する現象である．

台風は熱帯低気圧であるので中心気圧が低く，1気圧（1013 hPa）との差によって起こるのが吸い上げで，1 hPa低くなると1 cm上昇する．

一方，吹き寄せによる海面上昇は風速と地形によって異なり，奥が細くなっているような湾では高くなる傾向がある．台風時には，高潮による海面上昇による波の高さが高波に加わり，海岸堤防を越えて被害が発生する．沿岸域の大都市である東京・名古屋・大阪でも，犠牲者を出している．特に，伊勢湾台風では5,000人以上

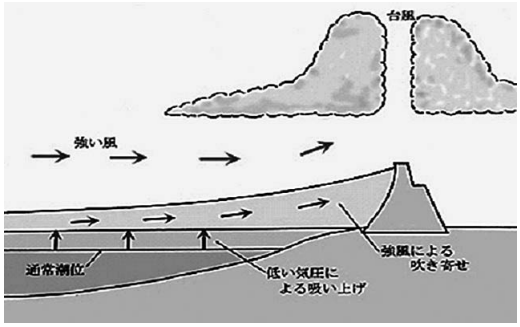

図-2.2　高潮発生のメカニズム

写真-2.3　海水が流れ込む改札口

写真-2.4　地下鉄86通り駅構内

写真-2.5　イーストヴィレッジ

の犠牲者を出したことから，各地で高潮対策が進み，防潮堤や防潮水門が整備されて現在に至っている．現在の複雑で高度化された都市が大規模な高潮に見舞われると，その被害は甚大なものになる可能性がある．

わが国の三大都市と同じ大都会であるニューヨークで，2012年10月末にハリケーン・サンディによる高潮被害が発生した．現在，この被害を教訓にして，わが国での対策が見直されている．

図-2.3　ローワーマンハッタン

ハリケーン・サンディは，カリブ海で発生し，アメリカ東海岸沿いに北上し，10月29日に進路を北西方向に変えて，ニューヨーク州の南隣のニュージャージー州に上陸したが，上陸前に温帯低気圧となっていた．この高潮では，住宅地に流れ込み被害が発生し，ニューヨークの中心地であるマンハッタン地区では，ローワーマンハッタンと呼ばれる南端付近を中心に被害が発生した．

マンハッタンの大部分は高台になっているが，周辺の埋め立て地の低い地区には防波堤はなく，岸壁より海面が高くなり，浸水した深さが1.3 mに達した場所もあった．この地区の地下鉄・地下トンネル・地下駐車場・地下室などの地下空間では浸水被害を受けた．

また，マンハッタンは，対岸へ続く21の鉄道，地下鉄や道路トンネルがあるが，そのうち，四つの鉄道トンネル，八つの地下鉄トンネル，四つの道路トンネルが浸水被害を受けた．

ハリケーンの襲来時は，連邦政府，州政府，地方自治体，住民組織などが連携して対応し，上陸前日に地下鉄や道路の使用をストップしたので，地下鉄やトンネルでの人的被害はなかったが，地下駐車場などの小規模な地下空間では，案内員が逃げ遅れて亡くなったり，道路を歩いていて氾濫水でビルの地下に押し流されて亡くなったりしている．一般家庭でも，地下室に避難していた人が浸水により亡くなった．

なお，地球の温暖化に伴って海水温の上昇が続き，2013年フィリピンを襲った規模のスーパー台風が我が国にも上陸し，大きな災害が発生することが懸念されている．

2-3　近年の都市水害発生原因と種類

（1）近年の都市水害発生原因

日本の川は短くて勾配が大きいので，降った雨は短時間に川へ流れ込む．したがって，川の水位が急上昇するとともに，大量の土砂を運ぶ．運ばれた土砂が長い年月をかけて平野を形成し，そこに東京・名古屋・大阪のような都市が発達してきた．このように，日本の多くの大都市は，川が形成した沖積平野にある．しかも，国土の10％の沖積平野に，約50％の人口と約75％の資産が集中していて，もともと洪水にはぜい弱な土地であり，高度経済成長期の産業の発展に伴い，過剰な地下水のくみ上げによる地盤沈下が発生し，「ゼロメートル地帯」と呼ばれる地域が出来た．

一方，都市部では，住宅地不足から山を削った宅地開発が進んだ．すなわち，山林を保有している地権者は少しでも高く土地を売るために，開発申請許可を得るために狂奔した．その結果，図-2.4に示すような宅地が多くなった．これが住宅地域における災害発生の素因ともなった．

図-2.4　山麓地域に開発された住宅地

次に，都市水害の誘因と考えられるのは大雨である．地球温暖化に伴うエルニーニョ現象，海水温上昇，積乱雲の発生により，「記録的短時間大雨」による浸水被害や土砂災害が発生する可能性が高まっている．

山地部に降った雨は地面にしみ込むが，やがて川に集まり下流へ流れる．斜面にしみ込んだ水が原因で，地滑りやがけ崩れが発生し，その土砂が川をせき止めるようになり，一気に押し流されると「土石流」となって，高速で沢を流れ下りる．広島市安佐南区で2014年8月大きな土石流が山麓部に位置する住宅地を襲ったのも記憶に新しい．

時間30 mmの雨は「バケツをひっくり返したような」と例えられるが，実感するのが難しい．

近年，これを上回る時間50 mm以上の雨の発生回数が増えている．降った雨は，自然に川には流れ込まない場合，地面を流れて道路側溝から下水管を通ってポンプ場に集められ，ポンプを使って川に排出される．これが雨水排水設備であるが，時間50 mmから60 mmの雨に対応できるように設計されているので，それを超える雨が降ると道路や低い土地が浸水する．

河川の水が溢れて発生する氾濫は「外水氾濫」とよばれる．流域に降った雨が河川に集まり，洪水となって流下し，そして氾濫するという事象である．われわれが住む街に雨が降っていなくても，上流部の山あいでの激しい雨で洪水が発生した結果，都市域の下流部で河川の水位は急上昇し，場合によっては溢れてしまうこともある．

一方，都市部では短時間でも激しい雨が降れば，雨水を下水道で処理しきれなくて氾濫が生じる．このような氾濫は「内水氾濫」とよばれ，都市部の低平地でよく起こる．短時間豪雨により頻発するのもこの種の氾濫である．都市水害と言っても，その発生のメカニズムは様々であり，自分たちの街で発生した，あるいは発生する可能性がある氾濫が，どのようなタイプのものであるかをしっかりと理解しておくことが重要である．

（2）近年の都市水害の種類と基本的な対策の方向性

a. 河川氾濫および増水

大雨の水が河川に集まってきて流量を増し，人工の堤防や自然の河岸を越え，あるいはそれを決壊させて，河川水が河道外（堤内地）に溢れ出るという洪水が，日本で最も頻繁に起こる災害である．この河川洪水は，まず河川水位の上昇から始まる．

降雨がさほど強くないと雨水は地中に浸透して地下水となるが，強くなって浸透する量を上回ると地表に水面が出現し，傾斜があるとその方向に地表面流が流れ出し，河道に流入して河川流量を増大させ，洪水時の流量の主要部分になる．

洪水の規模を表す最重要の水文量は，最大流量あるいは最高水位である．あまり大きくない河川では，大雨時の最大流量は，流出率，降雨強度および流域面積を掛け合わせて求められる．流出率は，河のある地点の上流域（集水域）に降った雨のどれだけの割合がその地点に流れ出してくるかを示す値で，地中への浸透や地表面での貯留の量が多いほど小さくなる．日本の山地河川ではほぼ0.75～0.85，平地小河川では0.45～0.75程度の大きさで，降った大雨の総量が同じであっても集中して河川に流れ出す．最大流量（あるいは最高水位）を大きくならなければ，洪水の氾濫が生じないか，あるいは洪水の規模は拡大することは少ない．

一方，水量を増した河川の水が堤防から平野側へ溢れ出すと，洪水の氾濫となる．氾濫には「破堤（堤防が完全に突き破られた場合）」と「越流（堤防を越える場合）」とがある．氾濫の規模は破堤の方が大きくなるので，あえて堤防を低くして影響の少ないところに氾濫させたり，堤防に切れ目を入れて穏やかに氾濫させるといった方法もとられる場合がある．

古くから堤防は，「土」で堤防を造られた．その理由は，「土」は簡単に入手できるので，築造，復旧・補修が容易であるという利点があるからである．しかし，堤防を乗り越える流れは堤防を削り，水位が高いと堤防全体に水が浸透して弱くなるので，越流は破堤を起こす最大の原因になっている．2015年の鬼怒川が常総市で破堤したのは，これが原因であった（写真-2.6参照）．

写真-2.6　鬼怒川氾濫状況

また，破堤が生じやすい場所としては，河の屈曲部，合流点付近，河幅が狭くなっているところ（狭さく部），水門の設置個所，橋・堰の上流，旧河川の締め切り個所，などが挙げられる．すなわち，河川氾濫による災害には，地形からの素因があることが分かる（図-2.5参照）．河が曲がっていると外カーブ側の堤防に流れが突き当たって洗掘が生じ，また，遠心力の作用によって外カーブ側の水位が高くなる．このため，河をまっすぐにする工事が行われている．洗掘を防ぐためには，堤防のり面をコンクリートで覆うという護岸工事が行われ，合流個所では本流の水が支流へ逆流して溢れることもあるので，流れが渦を巻いて洗掘を起こす可能性があることも留意すべきと思われる．

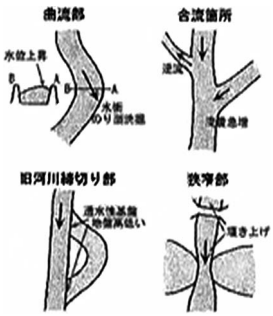

図-2.5　破堤危険箇所

越流や破堤によって河から溢れ出た水は，低きにつくという性質に従い，基本的には平野地形の最大傾斜の方向に流れ，より低い場所に集まる．平野内には，自然堤防と呼ばれるさまざまな形や高さの微高地，小河川堤防・道路のような線状の構造物などが

あり，洪水の流動に影響を与える．

多量の土砂を山地から運び出す河川では河床が上昇して天井川のようになるので，氾濫水は河道から離れ平野内部に広く流入する．これを防ぐために護岸を次第に高くした結果，その天端は周辺の地盤よりも高くなる可能性もある．写真-2.7のような人工的な護岸を築造すると，氾濫流入量が少ない場合には一般に水深が小さくなるので，親水性護岸として河川利用も可能である．しかし，山地の降った大量の雨が一気に流れ込むと，河道の水位が急激に上昇する．2008年7月に発生した神戸市都賀川の事故は正しくこのタイプである（写真-2.8参照）．

写真-2.7　人工的な護岸

午後2時16分 川の流れは穏やかで，親子連れが水遊びを楽しむ姿が確認できる＝28日，いずれも神戸市灘区篠原南町，都賀川の甲橋付近（神戸市ホームページのモニタリングカメラの映像から）

同32分　雨が降り始め，河川敷から人影が消える

同42分　突如猛烈な雨となり，川の様子が一変して激流に

同50分　水位は10分間で1.34m上昇し，河川敷が隠れるほどになった

写真-2.8　都賀川事故の経緯

このように，増水による水災害も増加することが懸念される．

このような地形・地物とその配列の仕方が大きく影響して，浸水域がより限定される．低いところが必ず浸水しやすいということにはならない．流れの先を閉ざすように自然堤防や道路などが配列していると，流れが堰上げられて，局所的に激しい洪水流が生ずることがあるので，氾濫流入量が多い場合にこのような危険が増すことに十分留意する必要がある．

b．内水氾濫

平坦地に強い雨が降ると，雨水ははけきらずに地面に溜まる．低いところには周囲から水が流れ込んできて浸水深がより大きくなる．また，排水用の水路や小河川は水位を増して真っ先に溢れ出す．このようにして起こる洪水を「内水氾濫」と呼び，本川の堤防が切れたり溢れたりして生ずる「外水氾濫」と区別している．ただし，内水の範囲はあいまいで，ある平野を流れる主要河川（本川）の水を「外水」とし，その堤防の内側（平野側）における水を「内水」と呼んでいるので，どの河を本川とするかによって，「内水の範囲」が変わる．通常，平野内に水源をもつ比較的大きな排水河川が溢れ出す場合や，台地・丘陵内の小河川が谷底低地内に氾濫する場合も「内水氾濫」に含めている．

都市やその周辺の新興市街化地域において「内水氾濫」による水害が特に問題になっている．「都市域における内水氾濫」は「都市水害」と呼ばれ，都市の構造によって被害が拡大し，地下街の浸水など新たな種類の被害が発生している．例えば，図-2.6のように，本来なら住宅からの雑排水が下水道を通して河川に流入するところ，河川の水位が上昇することによって，水圧が上がり住宅へ逆流する被害が発生している．

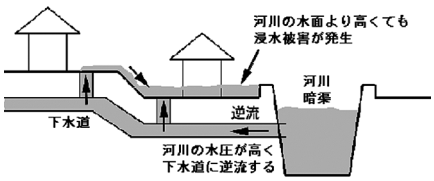

図-2.6　下水道逆流による被害

大都市域に大雨が降ると，浸水家屋が数万棟以上にも達することもある．2000年9月の東海地方の豪雨では，愛知県下の6万4千棟の家屋が浸水した．浸水戸数が多くなると被害額が巨額になり，10万棟が浸水すると被害金額は約1兆円程度と言われ，大量に発生するゴミの処理

が水害後の課題になっている．

「内水氾濫」では，水がはけきらなくて溜まる場所で，もともと排水条件の悪い凹地のような地形のところで発生する．かつてはこのような場所は，大雨時に雨水が滞留して遊水地となり，周辺の浸水を防いでいた．しかし，市街地化が進むと逆に遊水が有害水となり，以前と比較すると，多くの雨水が流れ込み，これまではなかったところで内水氾濫が発生するようになる可能性がある．

したがって，内水氾濫常襲地は遊水地として残しておくべきであり，低湿地にポンプ場や排水路などの施設を設けたとしても，浸水を被りやすい脆弱な土地であることに変わりなく，あえて開発・利用する場合，被害あるいは防止対策の費用は，その脆弱な土地を利用し日常的な便益を得ていることの必要コストとして，内部化（受益者負担）されるのを基本とすべきであろう．近年，大都市では地下河川（写真-2.10参照）の建造に巨額が投入されているが，誰が負担するかは検討の余地がある．

対象地区への流入量（降雨の量および周辺から流れ込む量）が流出量を上回らないようにするのが，元来の内水氾濫の防止対策である．流入量を減らす方法としては，流域内で積極的に雨水の貯留と浸透を図る，すなわち「流す」のではなくて「溜める」「しみ込ませる」が基本となる．この点は「河川洪水」の場合でも全く同じである．今後，原点に立ち返り，環境面および防災面の両面から検討する必要があろう．

写真-2.9　東海豪雨による被害状況

写真-2.10　都内　洪水調整池（ϕ 13.5 m）

また，市街地が浸水した場合，浸水域から避難するには歩行困難になる．深くなれば浮力が効いて，足をとられやすくなる．下水の水圧によってマンホールの蓋がはずれている道路が冠水すると，非常に危険であるので，避難時には足元に十分注意する必要がある．2009年8月の佐用町で発生した災害のように，冠水した道路を夜間避難していた際に排水路に転落して溺れて死者が発生する事例もあり，避難時期の検討が必要である．

地下空間への内水の流入による被害も発生している．例えば，地下街への階段，立体交差での路面の掘りこみ個所（アンダーパス），丘陵斜面を通ずる道路などでは，激しい流れが生じるので，人が押し流されることも起こっている．早めの避難行動に移すための情報伝達をいかに「早く」「精度よく」行うかを検討する段階に入っている．

c.　土砂災害（地すべり，土石流）

土砂災害によって，毎年多くの人命が奪われている．1897年（明治30年）に砂防法が制定されて以降，近代的な砂防工事が施工されるようになって110年以上が経過した．また，1982年（昭

和47年）の長崎大水害を契機に警戒避難が重点施策の一つに位置付けられて30年あまりである．

この間，ハード・ソフト両面における技術の開発と事業の進展により，土砂災害対策は着実に進んできた．例えば，ハード面では，透過型砂防堰堤やソイルセメントの普及など，構造や材料などにおける技術開発の成果が実用化されてきている．

また，ソフト面でも，土砂災害警戒情報の普及や1999年（平成11年）6月に広島市や呉市で発生した土砂災害をきっかけに施行された「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律（通称：土砂災害防止法）に基づくイエローゾーン・レッドゾーンの指定が義務化されたことなどがあげられる．

しかし，このような不断の取り組みにもかかわらず，土砂災害による被害は発生し，むしろ激甚さの度合いは増しているようにさえ見える状況である．

住宅地域における土砂災害には，「地すべり」「急傾斜地の崩壊（土砂崩れ）」「土石流」「滑動崩壊」に分類される．前者の3つは，自然の地盤や自然崖が発生の主体であるのに対して，「滑動崩壊」は，人工的な盛土が対象である．本来は安定を保っていた地盤が経年劣化や地下水の状態で変化し，土砂災害の素因となる地盤強度の低下となっている．さらに，地震や降雨（豪雨），融雪などの誘因が引き金となって災害の拡大となってきている．

本稿では，土砂災害のうち，住宅地域に大きな災害を発生させる「地すべり」と「斜面崩壊，特に土石流」のによる災害について述べる．

「地すべり」とは，斜面の土塊が非常にゆっくり動く現象で，動きの速い「斜面崩壊」と区別している．1日で数ミリから数センチと速度は遅いが継続して動くので，かえって危険性が強く意識される．その結果，長期間の道路閉鎖，立ち入り禁止など，地域の社会経済活動への長期的影響が生ずることがある．このような滑りは，粘土化しやすい性質の岩石である第三紀層泥質岩，変成岩および火山変質岩の地域にほぼ限られる．したがって，一般の斜面崩壊はほとんど起こらない10～20度という緩やかな勾配の斜面でも発生する．

地すべり地形の特徴は，円弧状の急な崖の下に緩やかに起伏する斜面がある点である．この緩やかな斜面は地すべりの土塊であり，それが滑ってずれたところが上方の急な崖となる．地すべり地内には，池・湿地・棚田などがよく見られる．滑り面の深さは10ｍ以上と深く，その上に載って動く土塊の量が大きくなる．ゆっくりと動き，規模が大きく図-2.7のように，地すべりは特徴ある地形を示すので，そこが地すべりする可能性がある地域であることが比較的容易に判断でき，地形が地すべり発生の素因となる．

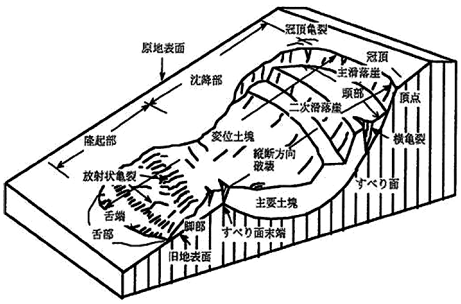

図-2.7　地すべり発生のメカニズム

一旦滑りやすい条件が作られると長い間それが続き，一度止まっても，地下水の増加や人為作用などにより不安定化すると，再び動き出すことが繰り返される．

また，地すべりの運動開始の主要な誘因は地下水の増加であり，このため，主な発生時期は梅雨期と融雪期である．道路建設による地すべり土塊先端の切り取りや地すべり地内を通る道路の建設による集水・浸透条件の変化，ダム貯水による地下水位上昇などによって，再発することが

ある．大きな滑動の前には，山腹や道路に亀裂が発生したり，湧水がなかったところから水が湧き出す，地鳴りがする，木が傾く，などの前兆が見られるので，裏山にこのような異常が認められたら，避難の準備をしておく必要がある．

「斜面崩壊」とは，斜面表層の土砂や岩石が地中のある面を境にして滑り落ちる現象である．山崩れ，崖崩れ，あるいは一般に「土砂崩れ」と言われている現象が該当する．土砂･岩石が急速に運動する様式には，「滑る」の他に「落ちる」（落石など），「流れる」（土石流など）がある．

斜面の地層は斜面傾斜の方向に絶えず引っ張られている．地層はそれに抵抗する力を働かせて，斜面の変形や移動を抑える．大雨と地震動などの原因により，地層内のある面において，下に引っ張る力が抵抗する力を上回ると，この面で地層が断ち切られて，上にある土塊が一体となって滑り落ちる．

土塊を斜面傾斜の方向へ動かそうとする力は，その土塊の重量が大きいほど，また，斜面傾斜が急なほど，大きくなる．雨水が地中に浸透するとその水の重さ分だけ土塊の重量が増して，崩壊を起こそうとする力は大きくなる．大雨による崩壊の場合，斜面の傾斜角が25度よりも大きくなると崩れる可能性がある（図-2.8参照）．

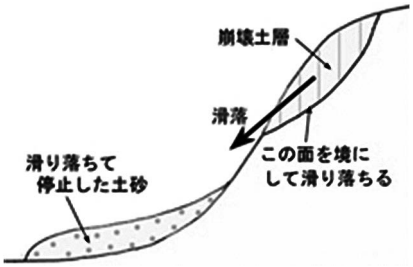

図-2.8　斜面崩壊の発生条件

われわれが一番注意しなければならない斜面崩壊は「土石流」であろう．「土石流」とは，大雨による山崩れの土塊が砕けながら谷間に滑り落ち，増水した谷の水と混じりあって谷底を高速で流れ下る現象である．岩や礫が衝突してお互いを跳ねのけあう反発力が直径2～3ｍもの岩塊や砂礫の集合体を流れるような状態にする．谷底が急勾配であると，この集合体の運動速度が大きくなるので，ぶつかり合いが激しくなるので岩や礫の間にすき間ができる．このすき間には泥水が入り込むので，岩や礫はいわば浮いたような状態になり，全体は流体である土石流に変わる．

土石流中には種々の大きさの砂礫や岩塊が混じっており，小さいものは狭いすき間でもすり抜けて落ちていくので，大きい岩や礫は表面へ押し上げられる．土石流の表面に出た大きな岩礫は，表面の速い流れに運ばれて先頭に集まる．こうして土石流の先端では大きな岩や礫が盛り上がり，激しく転がりながら後から続く流れを従えて進む．

流れを作る力は，「流動する層の厚さ」と「地表面の勾配」との積に比例するので，谷底に厚い堆積土砂があると，土石流はこれを取り込み，流動層を厚くして勢力を増し，さらなる取り込みを行って，雪だるま式に成長する．なお，運動速度はおよそ10～20ｍ/秒程度である．

谷の勾配が10度以下ともなると，岩や礫の間の接触抵抗が大きくなり，流動性が低下して減速し始め，勾配がおよそ2～3度のところで停止する．この減速・停止域では，砂礫が堆積して扇状地のような地形が作られる．

土石流が発生しやすい谷は，山崩れが起きやすい山地内にあり，急勾配区間（15度以上）が長く，谷底に土砂が厚く堆積している谷である．谷底の幅や勾配に変化の多い谷では，土石流の一時的減速により厚さが増して，土石流の規模が大きくなる．火山灰や火山礫などで作られている火山の谷では，一般に土石流発生の危険が大である．特に，噴火によって新しく火山灰で覆われると，強い雨の時に表面流が生じやすくなるので，噴火後しばらくは土石流が頻繁に発生する．

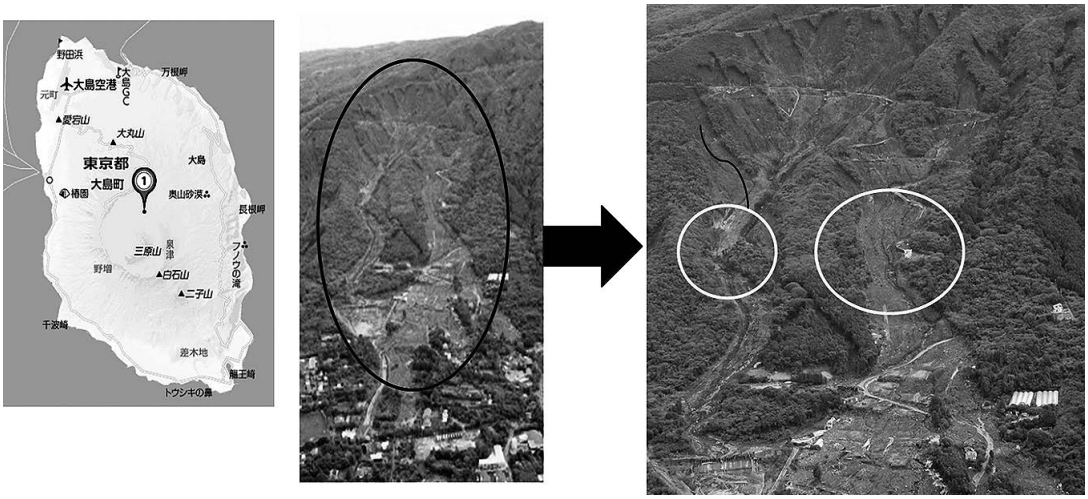

写真-2.11　平成25年台風26号による土砂災害

火山の谷における土石流は火山泥流と呼ばれることがある．

2013年10月に襲来した台風26号により，伊豆大島では時間122 mmの大雨が降り，24時間降水量が750 mmを超えた．その結果，山腹等に堆積した火山灰が降雨によって泥流・土石流となって道路や家屋に被害をもたらした（写真-2.11参照）．

この土砂災害の主原因は，

①噴火活動が活発な時期と活発ではない時期がある伊豆大島特有の山頂部から噴出したスコリア・細粒火山灰という伊豆大島特有の地質条件であった

②元町地区上部の急な斜面に，記録的な強い豪雨が短時間に集中し，かつ崩壊発生後も継続したことにより広い範囲で崩壊と侵食が発生した

③大規模な土砂流出となって短時間で下流の市街地に到達したこと

④さらに斜面上の樹木が大量の流木となって出水と一緒に市街地を襲った

と考えられている．

3．地下浸水の発生事例

日本の都市の多くは沿岸域，海に近い低平地にある．東京は176万人，名古屋は90万人，大阪は138万人がゼロメートル地帯に住む．そこに数多くの地下空間がある．表-3.1のように，現在では地下空間が多いに使用されている．地下空間は規模によってさまざまなものがある．水は低いところに向かうので，水害が起こると水は地下に集まる．その時に何が起こるか，どう避難するかを考えていかなければいけない．

バブル期，地上部の限られた土地確保のために狂奔し，その結果，地価は高騰した．そこで，都市域で残された空間として，「地下空間開発」が計画された．しかし，法律からすると，石油・石炭など資源の採掘権が及ぶのは地球の中心までという解釈から

表-3.1　地下空間の利用種別

規模	地下空間の種類	面所数
大	地下鉄	640以上
↑	地下街	78以上
	地下駐車場	多数
↓	アンダーパス	多数
小	地下室	多数

地表面の所有者の私権がどの程度の深度まで及ぶかが議論され始めた．そこで，地下空間の有効利用の観点から法整備が始まり，議員立法の提出の動きがあったのは，昭和末期の竹下内閣の頃であった．

商社，ゼネコンをはじめとする民間企業および建設省（当時），運輸省（当時），厚生省（当時），郵政省までも大深度地下開発構想を打ち出した．しかし，バブル崩壊により，大深度地下空間開発は頓挫した．

時は平成となり，地下鉄などのインフラ整備計画が進むにつれ，私権の及ばない地下空間領域を設定することの利点が再度見直され，東京，大阪，名古屋の三大都市圏における地表面より40 m以深には私見が及ばない通称，大深度法が施行されることに至った．

以下，表-3.2に1980年以降の地下空間における被災事例を示し，主な被災事例について言及する．

表-3.2　1980年以降の地下空間における被災事例

1982年	7月	長崎水害
1983年	8月	東京メトロ 赤坂見附駅
1999年	6月	福岡水害
	7月	新宿・地下室
2000年	9月	東海豪雨
2003年	7月	福岡豪雨
2008年	7月	向日市（京都府） アンダーパス
2010年	11月	和歌山市 地下駐車場
2011年	3月	東日本大震災
	8月	大阪梅田
	9月	台風15号 JR高蔵寺駅
2012年	8月	京都，大阪
2013年	9月	京都市営地下鉄 御陵駅

3-1　1999年6月　福岡水害

（1）概要

1999年6月29日朝，福岡市では最大時間雨量77 mmを含む豪雨に見舞われた．市内を流れる御笠川の流域にも同様に強い雨が降り，市内を流れる御笠川およびこれに合流する山王放水路が溢水した．この氾濫水は道路を水路のように伝って，地盤高の低いJR博多駅方面に向かって流れ，駅およびその周辺の地下街，ビル地階，地下鉄空間に流入し，各施設は浸水被害を受けた．福岡市営地下鉄も4時間近く運転を見合わせた．そして駅から約400 m離れたビル地階にある飲食店の従業員が，氾濫水の流入により浸水した店から逃げ遅れて水死するという痛ましい事故も発生した．御笠川から溢れた氾濫水が低地に流れこみ，地下浸水が短時間のうちに発生したことが，この水害の大きな特徴である．なお，上流域の豪雨による御笠川の溢水が2003年7月にも発生し，地下浸水を含む同様の水害が繰り返されている．

（2）被災原因

博多駅周辺における浸水の主原因は御笠川からの溢水氾濫と内水氾濫であると考えられる．図-3.2に示すように，午前8～9時が降雨量のピークであったこと，博多湾の大潮満潮が9時32分であったこともかさなって，午前

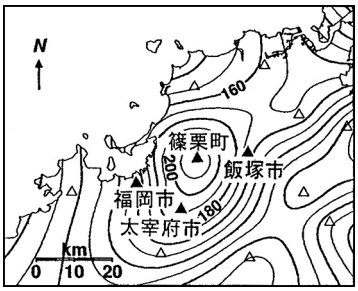

図-3.1　6月29日の雨量

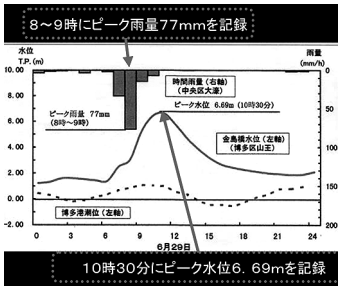

図-3.2　時間降雨量および博多湾潮位

10時頃より御笠川の数ヶ所から溢水が発生し，氾濫水量が急激に増加したものと推測される．その結果，外水氾濫も発生する事態となり，図-3.3のような福岡駅周辺が浸水域となった．御笠川の改修工事計画はあったようであるが，工事着工にまでは至っていなかった．さらに地形的に御笠川堤防よりも駅周辺の方は約2 m低くなっていたことも駅周辺の被災の要因と思われる．

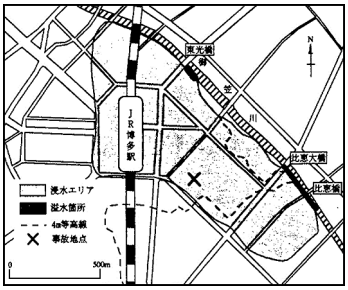

図-3.3　事故発生場所

（3）被災形態

主な被災形態は次のようである．

a. 地下街

博多駅周辺にある地下街では，階段やエレベータなどの通路から氾濫水が流れ込んだために被害が発生した．筑紫口では，図-3.4のような地下出入口があり，地下にある約160の店舗が5～10 cm程度浸水し，商品への影響はもとより空調設備への被害も発生した．なお，氾濫水は最終的に地下2，3階に設置されていた貯水槽に排水されたので，被害はある程度抑えられたものと考えられる．

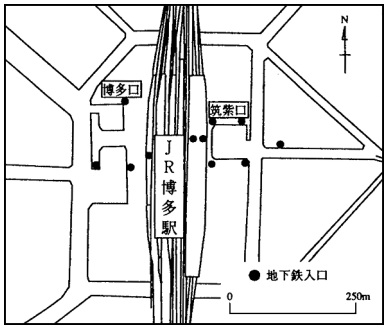

図-3.4　地下鉄出入口の位置図

一方，天神地下街や地下駐車場でも浸水による被害が発生した．デパートの地下売場では商品に被害が生じたので臨時休業とした．

b. ビル地下室

氾濫水が地下に一気に流れ込んだので，地下室全体が水没した事例は多く，従業員1名が犠牲になったビルもあった（ビルの位置は図-3.3参照）．このビルでは，地下駐車場出入口，地下天井部分の採光用の隙間，地上との出入口から氾濫水が急激に流入したようである．また，地下にあった電気設備が故障，空調機器，ボイラーや浄水タンクが冠水したので，営業に支障を来たすホテルも出た．なお，ホテルの地下電気設備が一部博多駅周辺のビルと連動していたので，ホテルにおける被害が他に影響した事態も発生しているようである．

c. 地下鉄

氾濫水は地下鉄ホームまで流入し，レール冠水したので約3時間半の運休措置が取られた．

3-2　東海豪雨

（1）概要

2000年9月11日から12日にかけて，本州上には前線が停滞していた．一方，大型で非常に強い勢力の台風第14号が日本の南にあってゆっくりとした速度で沖縄方面に進んでいた．

この前線に向かって，台風周辺の非常に暖かく湿った空気が断続的に流入したため，東海地方では，ほぼ同じ地域で長い時間にわたって積乱雲が発生・発達した．

特に，愛知県西部から三重県北中部にかけて局地的的な豪雨となり，名古屋市や東海市では日最大1時間降水量や日降水量が観測史上第1位を更新するなど猛烈な雨が降った．名古屋では11日02時から，東海市では11日01時から降り始めた雨は日中弱まったが，宵の内になり突然激し

い雨に変わり，名古屋では18時06分～19時06分の1時間には97 mmの記録的な豪雨となり，東海市では18時～19時の1時間には114 mmの記録的な豪雨となった（図-3.5参照）．その後，12日明け方まで強い雨が続いた．2日間の総降水量は名古屋で567 mm，東海市で589 mmと共に年降水量の3分の1を超えた．

この豪雨で名古屋市及びその周辺の市町村では堤防の決壊，河川の越水により，広範囲で浸水害が発生したほか，各地で土砂災害も発生した．県内では死者7名，重軽傷者107名，床上浸水24,610世帯に達する甚大な災害が発生した．

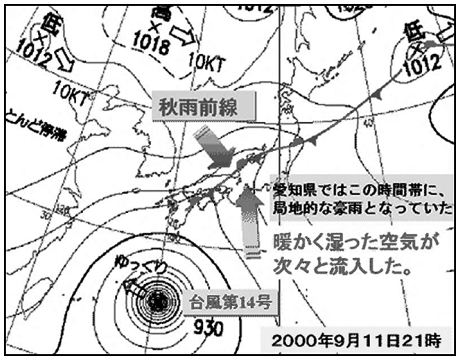

図-3.5　地上天気図（200年9月11日21時）

（2）地下鉄の被害

天白川流域では越水により浸水被害が発生した．天白川は日進市の三ヶ峰付近に発し，名古屋港に注ぐ延長23.05 kmの都市河川であり，32 km^2に及ぶ氾濫区域に人口21万人，家屋7万戸，資産約1兆3千億円が集中している．特に今回浸水被害が大きかったのは，天白区野並地区であった．図-3.6のように，天白川・藤川・郷下川に囲まれた野並駅の北側に位置する標高6 m以下の中坪町，井の森町，野並2丁目などでは浸水被害が甚大であった．

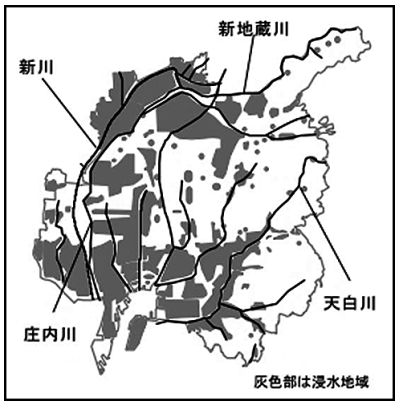

図-3.6　名古屋市周辺の河川と浸水地域

地下鉄野並駅では，駅構内が1 m以上浸水したほか，野

写真-3.1　野並駅コンコース（プラットホームへのエスカレータ）

写真-3.2　野並駅コンコース（約20 cm流入水が溜まった）

写真-3.3　野並駅出入り口（高さ40 cmの新型止水版）

写真-3.4　野並駅駐輪場出入り口状況

写真-3.5　駐輪場出入り口と郷下川

写真-3.6　道路面を通り天白川へ

並2丁目の道路では1m近く浸水しバスや乗用車が水没した．

地下鉄桜通線野並駅では，新型止水版が設置されていたので，道路面から雨水の流入はなかった．しかし，駅利用者用の区役所が管理している駐輪場出入り口のから郷下川の氾濫水が流入し，駅のコンコースを経て地下鉄の軌道面まで到達した．その結果，軌道は冠水し，運行停止となり，全線復旧したのは，翌12日の18:00であった．

（3）新川沿いの被害

新川左岸に位置する名古屋市西区は，近年，鉄鋼，金属，機械，化学など工業地帯として発展してきており，現在でも多数の工場が点在している．また，同様に左岸には，名古屋市のベットタウンである西枇杷島町には，住宅と工業が共存している．

その新川が破堤したので，西枇杷島町の全世帯約6,500のうち，半数近くの約3,000世帯が床上浸水した．避難場所となった西枇杷島小学校付近では，浸水位が約1.5mにも上った．

新川左岸堤防と庄内川右岸堤防に囲まれた椀状の地域であるため，氾濫水が排出されず，家屋や交通幹線をはじめとするライフラインが2日以上も水没した．特に，地上駅であった上小田井駅が冠水したので，地下鉄鶴舞線は運行できず，全線復旧したのは，桜通線と同様翌12日の18:30であった．

なお，名城線平安通駅は冠水したので，全線が不通となり，全線復旧は一番遅く，13日15:00であった（図-3.7参照）．

写真-3.7　破堤した新川

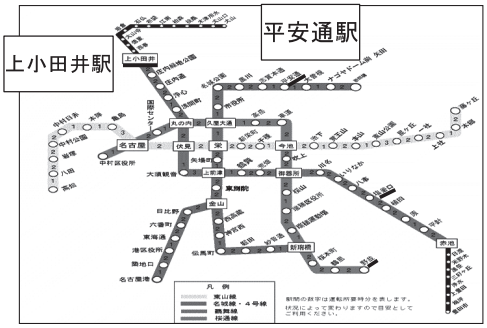

図-3.7　名古屋市交通局　地下鉄営業路線図

4．都市型水害から浮かび上がる課題

アスファルトとコンクリートに囲まれ，地下にはアリの巣のように交通網や地下街などの都市機能が発達する首都圏では，公園以外は，土の地面はなかなか見当たらない．

豪雨が降れば，地面にしみ込まない水は，低地へと流れて下水溝や河川に吸い込まれるが，下水や川が排水処理しきれないほどの雨量を抱え込んだ場合は，水があふれ出し，街は浸水してしまう．集中豪雨や台風に伴う，このような「内水氾濫」は，ここ数年の間に多発している．

以下，都市型水害事例から浮かび上がる課題を抽出する．

4-1　地下鉄・地下街の浸水へのハード対策

地下空間の浸水は1982年の長崎水害から見られるようになった．83年には東京の赤坂見附で地下鉄が浸水し，99年6月には福岡で，7月には新宿でそれぞれ1人が亡くなった．

梅田周辺を対象とした既往の解析結果では，地下街への流入量のピークは降雨量のピークよりも約1時間遅い場合が多い．時間雨量60mmまでは下水で排出できるが，それでもその雨量が3時間続いてしまうと，排出し切れなくなることが原因と判断できる．流入量の8割近くは地下街の

下に位置する地下鉄駅に流入するので，地下街の半分以上は水深50 cm以下で済む．一方で，地下鉄駅よりも低い上に排水先のない場所では，入ってきた水はそのまま溜まったままになることが考えられる．

「ゲリラ豪雨」によって雨水が地下鉄に流入するので，地下鉄内の浸水が進むが，流入箇所から1～2 km離れた所では雨は降っていないということにも留意する必要がある．

出入り口のかさ上げの高さは，20～30 cmのものが最も多い．つまり，道路に溜まった水がこの高さ以下であれば，地下空間に流れ込むことはないが，超えると流入する．これを防ぐために，止水板を設置することになっている場合が多い．

しかし，決して多くない地下鉄の職員が避難誘導を優先しながら必要な場所に止水板を設置していけるかどうか，という課題が残る．さらに，地下街の管理者とそれに接続する民間ビルの管理者の連携も避難誘導の面から不可欠になる．

4-2　地下鉄・地下街からの避難

避難しようとする時には何が起こるか．例えば，水が流れ込んでくる階段を上がって地上に出ることができるのか（図-4.1参照）．

水の流れは水深と流速を持つ．水深が仮に10 cmでも一定の速度を超えると危険になる．階段を流れ落ちる水は流速が毎秒4～5 mであるので，洪水時の河川の流れを超える．階段で足をすくわれて倒れたら，踏みとどまるのは困難であることが予想される．

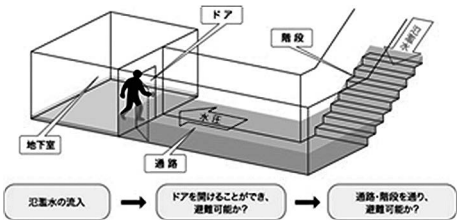

図-4.1　地下室からの避難の困難さ

川や海の中を歩いていて，意外に流れが速かったりして，戸惑ったことは多くの人が経験していると思われる．これは，水深の急激な変化，深さや流れの速さ（流速）の変化が原因で，体のバランスを崩すような力が働くためである．水による力は，水深で決まる「水圧」と流速と水深に関係する「流体力」がある．水深が2倍になると「水圧」は4倍になり，流速が2倍になると「流体力」は4倍になる．これは，水深や流速の少しの変化でも働く力が大きく変わることを示している．

では，水深はどのくらいの速さで変化するのか？雨水がマンホールや道路の側溝からあふれる「内水災害」では，平均的に1分間に2 cm程度の速さで浸水深が増える．また，川があふれて浸水する場合は，1分間に3 cm程度の速さで増える．ゆっくり増えるように思えるが，20分～30分という短い時間で床上浸水になり，歩くことが困難となる50 cmを超える．一方，海水があふれる高潮や津波の場合は，浸水直後の短時間で同様の状態になる．このように水深が変化するということは，水が流れて来ている状態であるから，その速度によっては歩行がさらに困難になる．

実際に，水深や流速を変化させて歩行する実験（写真-4.1参照）を行った結果，浸水した状態での歩行の危険性を水深と速度との関係を図-4.2に示す．

グラフの曲線より下の水深と流速の場合は，「助けを借りずに歩行する安全避難」が可能である．しかし，曲線を上回る状況では，助けがないと一人では歩行が困難となる．年齢や性別によっても異なるが，水深が浅くても流れが速ければ危険な状態になるということが重要である．人は，流れに逆らって進む場合，流れによる力に対してふんばることができるが，後ろから流れが来れば足をすくわれて転倒し，流される危険性がある．命を守るためには，このような状態になる前

写真-4.1　浸水時歩行実験の様子

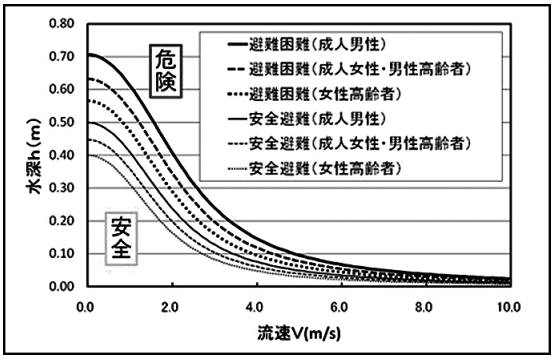

図-4.2　浸水時歩行の危険性

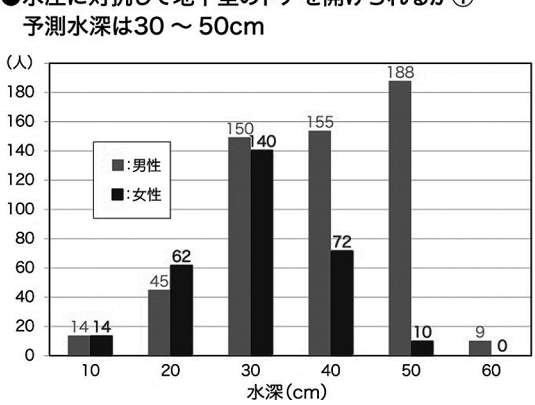

図-4.3　実験前のヒアリング結果

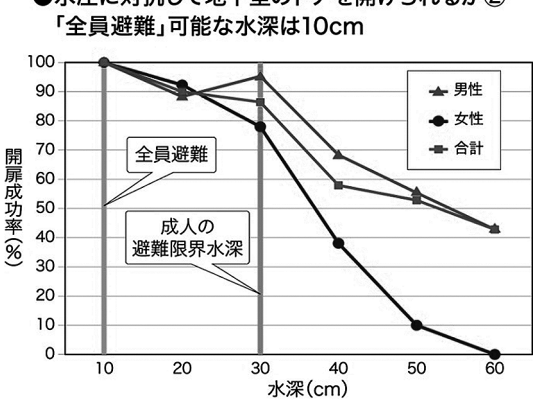

図-4.4　水圧に対する実験結果

に安全な場所に，早期に避難することが肝心である．

次に，最も危険なのは，地下室である．その理由は，幅が狭い上に火災時の避難のことを考えてドアが外開きになっているので，水が流れ込むと水圧に対抗してドアを開かなければならない点である．

同じ状況でドアを開けることができるかを，8歳の子どもから80代の高齢者まで合計859人の男女を対象に実験した結果を図-4.2に示す．

実験前にヒアリングでは，女性は30 cm，男性は50 cmという回答が最も多かったが（図-4.3参照），実験の結果では，全員が開けられたのは水深10 cmまでだった（図-4.4参照）．

ここで，重要であるのは，成人でも水深30 cmが限界だと考えなければならない点である．そこに至るまでに，どの程度の時間が掛かるのか．小さなビルの地下では，時間雨量80 mmで2分，100 mmで1分に過ぎない．その短時間で，水が流れ込んできていると気付かなければ，危険が迫ってくることである．

今後の課題としては，鉄道事業者，地下街の管理者，自治体などの連携強化を図らなければならないことを挙げることができる．さらに，地下駐車場もあるので，車が漂流物として流されてくる事態なども考慮する必要がある（図-4.5参照）．

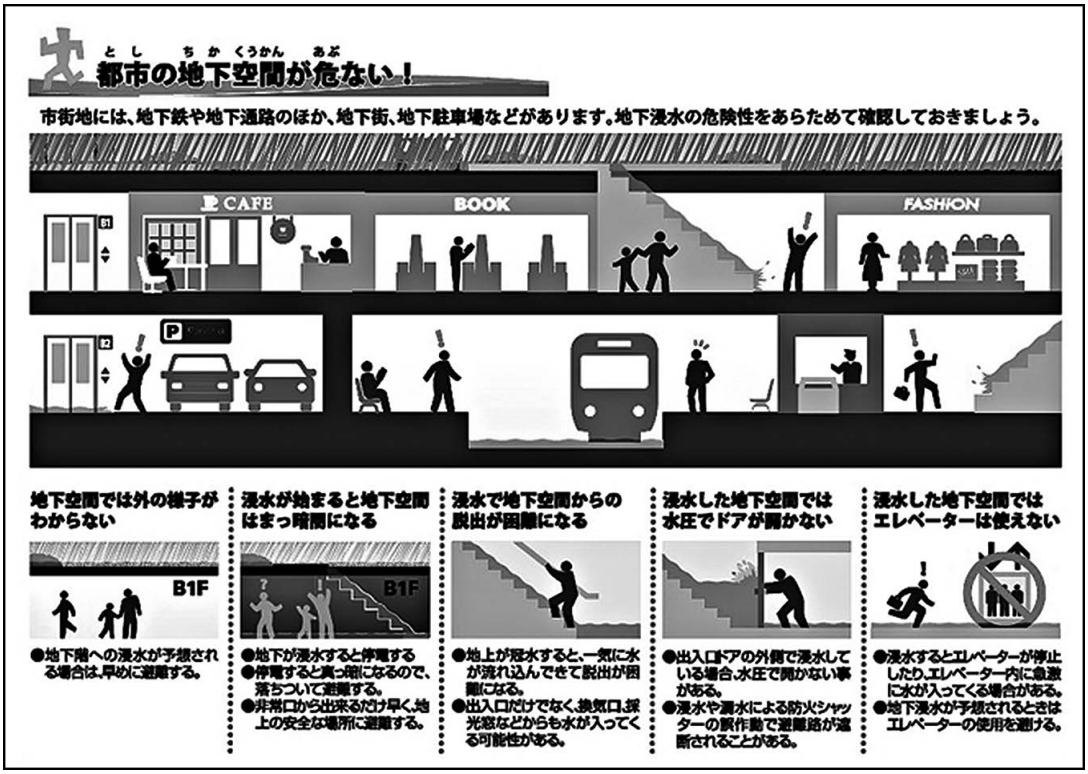

図-4.5　都市の地下空間における危険性

5．対策

都市水害に備えるにあたっては，豪雨によってどのような現象が起こりえるのかを予測することが重要である．

災害発生には「素因」と「誘因」があり，都市流域を対象とした数値シミュレーションモデルによる検討がなされ，その結果を踏まえて「ハザードマップ」が作成されている．

しかし，一部の防災を生業にしている研究者の中に，「ハザードマップの精度を度返しして，市民が信じ込むことが問題である」という意見がある．しかし，一般市民に対して，一定程度の危険性を提示するためのツールとしての「ハザードマップ」は必要であると考える．ハザードマップを見て，各自が持っている災害発生のメカニズムに関する知識を深化させることが重要である．

そのためには，過去の被災事例から何を学び，日々進化している科学によって発生原因を究明し，既往災害の外力規模を知り，先達たちの受けた災害内容と対策を後世に伝えることが重要である．

以下，都市水害の対策について挙げる．

5-1　素因を知ること

水は低きに流れるので，地下室や地下鉄，地下街といった地下空間への浸水が発生する．上述の東海豪雨でも地下鉄の駅が浸水した．ほかにも1982年7月の長崎水害，1983年8月の東京・赤坂見附駅の浸水，1999年6月と2003年7月には福岡でも地下空間浸水が発生し，1999年6月の福

岡，2003年7月の東京・新宿では，地下室への浸水による犠牲者が出した．これをきっかけに，地下空間浸水の対策や研究がなされてきている．

福岡水害の発生原因の一つに挙げられている「博多駅周辺が盆地構造」になっていることのような地形・地盤構造を踏まえた事前の数値シミュレーション結果を公開することによってそれぞれの箇所の「素因」を市民への啓発活動を通じて，周知・徹底を図ることが重要であろう．

5-2　誘因を知ること

（1）長雨による洪水の発生過程

雨の降り始めの状態で見ると，地表面へと降った雨は，地中へと浸透する．その後，地表面が飽和した状態になると，雨は地表面を流れ出す．なお，雨が地表を流れ出すまでの時間は，地表がどれだけ水分を含んでいるかによって変わる．また，河川の水位はゆっくりと上昇する（図-5.1参照）．

図-5.1　長雨による洪水の発生過程

（2）急激な水位上昇

①集中豪雨による洪水の発生過程

短時間に集中的に降る雨による洪水の発生過程は，通常の降雨状態と様相が異なる．豪雨時には，地中へ浸透する雨の量よりも地表面を流れる雨の方が多いので，通常の降雨状態に比べて，洪水が発生するまでの時間が短くなる（図-5.2参照）．

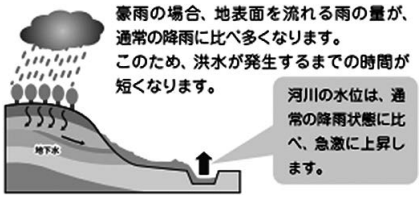

図-5.2　集中豪雨による洪水の発生過程

②都市部における洪水の発生過程

地表面の状況が人工的に変化すると，洪水の様子にも大きな影響を与える．例えば，森林や水田が宅地に変わったり，地表面が建物や舗装によって覆われることによって，雨水の地中への浸透がなくなったりするので，降った雨のほとんどが短時間で川に達する（図-5.3参照）．

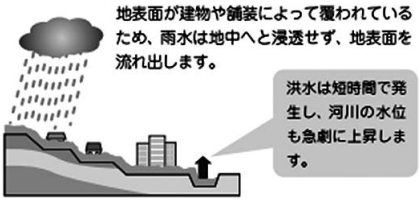

図-5.3　都市部における洪水の発生過程

写真-5.1のような「局地的豪雨（ゲリラ豪雨）」による大量の降雨による災害発生を防ぐために，気象庁はじめ国土交通省では，発生原因の積乱雲の動きをレーダで捉え，情報発信を行っている（図-5.4参照）．

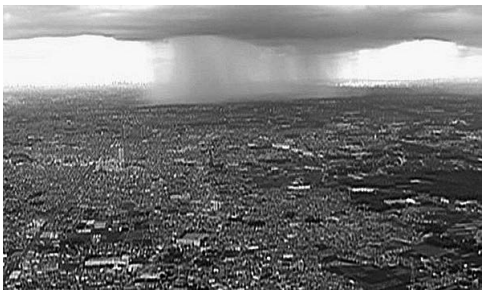

写真-5.1　ゲリラ豪雨の発生原因となる積乱雲

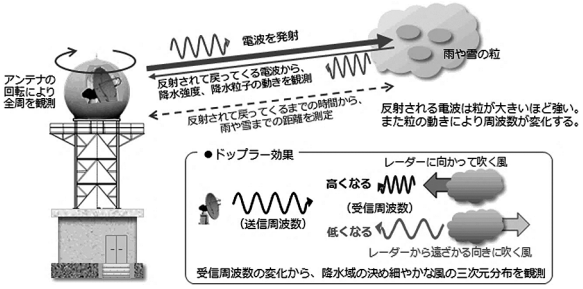

図-5.4　気象レーダ

5-3　具体的な浸水対策

（1）ハード的対策

計画対象とする降雨に対して，市中で外水氾濫，内水氾濫が発生しないようにすることが基本である．ここでの外水氾濫は市内河川の溢水を想定しているが，河川の洪水流下能力を点検し，河川から水が溢れないように河道の整備を図る．あわせて，流域全体で，河川の流量の増大を抑制するような，保水・遊水施設を適切に配置していくことが望ましい．内水氾濫対策では，雨水排除のための下水道整備が最も重要であるが，下水道網やポンプの排水能力の向上だけでなく，一旦雨水を貯留する大小様々な規模の雨水貯留施設を併用することが，被害の軽減を図るに有効である．とくに流域一帯が低平地の都市流域では，河川，下水道を分離せずに，流域全体を対象として河道での洪水処理，雨水排除，雨水貯留を総合的に考えていかねばならない．

（2）ソフト的対策

降雨情報や河川の水位情報を住民に迅速に配信し，洪水の発生や氾濫の危険性を伝えるシステムの整備が重要である．最近ではインターネットや携帯端末の普及により，リアルタイムに近い形で，災害に関連する情報を住民に知らせることができるようになってきている．これらの情報配信システムをさらに高度化するとともに，避難などの危機回避行動に有効に結びつけていくことが重要である．また，気象予測システムの開発もソフト的対策に含まれるものであり，ゲリラ豪雨の発生メカニズムの解明とその予測精度の向上が大いに期待される．

一方，氾濫水の広がりの予測は，かなり精度よくできるようになってきている．この技術をもとに，市内河川の溢水による外水氾濫および内水氾濫を想定した「都市水害ハザードマップ」を作成し，住民に氾濫危険か所ならびに避難を含めた氾濫時の対処法を知らせておく．従来の洪水ハザードマップは，比較的大きな河川の破堤による外水氾濫を対象としたものが主であったが，都市河川流域では，溢水による外水氾濫や内水氾濫の場合の浸水予測が重要となる．

また，マップ上には，地下空間やアンダーパスの浸水による危険性を明示し，さらに，上記の「都市水害ハザードマップ」や水害・水難事故の映像，氾濫現象を表現できるミニチュア模型などを活用した，住民への防災教育が重要である．様々な年代を対象とした，わかりやすい防災教育ツールの開発やインターネットを用いた情報発信など，水害に対する啓発活動の工夫と実践が大切である．

（3）危険か所への対策

浸水が想定される区域に位置する地下空間やアンダーパスといった危険か所では，早急な対応が望まれる．地下空間については，まず，階段などの地下への入口に止水板を設置したり，通路面よりも高くした段差（ステップ）を設置したりすることが考えられる．地上の浸水深がこれらの高さまでであれば流入が防げるとともに，これらを越えた浸水が生じたとしても浸水量を減らし，かつ浸水を遅らせる効果が期待できる．また，ビルの地下室には電気系統設備，情報通信設備などが集中しているが，それらについてもかさ上げを行ったり，材質に配慮したりして，耐水性に十分な注意を払う．地下浸水が起こりそうな場合や，万一，地下浸水が起こった場合は，速やかに地下から逃げだすことが何よりも大切である．ビルの地下室，地下駐車場では，複数の避難経路や建物の2階以上の場所への避難策などを考えておく必要がある．一般家屋の地下室では，地下には決して近づかないことを徹底する．

アンダーパスについては，アンダーパスを含む下水道集水区の排水能力を高めて，豪雨時の浸

水の防止・低減を図るとともに，浸水したときに誤って車両が進入することがないように，水深をセンサーで感知して緊急信号を発し，進入防止のカーテンが降りるような新システムが必要であろう．

（4）都市機能の確保策

万一の浸水に備えて，少しでも被害を軽減させる方法を考えておくことが重要である．浄水場や電気施設などのライフライン拠点の浸水に対しては，建物の耐水化やシステムのバックアップ策を講じる．交通障害の軽減については，まず，市中の氾濫によってどのような交通障害が発生するかを予測したうえで，氾濫を許容してはいけない河川か所の溢水防止策，道路ネットワーク上で重要な箇所のかさ上げや止水機能を有するガードレールの設置といった耐水化策，そして浸水時の交通規制策などをあわせて考えていく必要がある．これらの対策もハード・ソフト両面から構成されるものである．

地球温暖化に伴う海水温上昇による前述したニューヨークの「高潮被害」の何倍もの被害が発生する可能性は高い．ニューヨークのように，管理者が前日に地下鉄や地下トンネルの使用を停止することが，わが国でも可能かどうか．また，ゲリラ豪雨のような短時間に浸水するような場合に対応できるのかという問題が残されている．

6．まとめ

明治初期にオランダ人河川技術者として日本に滞在したヨハネス・デ・レーケは，次のような言葉を残している．「河川に，個性があり歴史がある．人間がそれを扱うには，この2点が大切である」．

われわれが忘れがちな「自然の中で暮らしている」という立場から生まれた先人の知恵や「言い伝え」が重要であることを語っている言葉である．これは，河川に限らず，「自然災害に対応する人々への教訓」である．

災害は，「自然」，「空間（構造物）」，「技術」，「社会」の四つの側面から考察する必要がある．「自然」の条件からみると，従来の外挿線の延長にない現象も出現してきている．このため災害が今後も多発することが予想される．したがって，物理現象モデルに基づく崩壊モデルの精度向上に努めることが重要である．

災害を減少させるためには「社会」の観点も必要である．研究成果として得られた危険度情報が行政や住民に認知され，被害を生じることがないような対応や仕組みづくりにも，積極的に関わる人材育成が必要であろう．

2004年の台風23号の際，京都府北部の由良川沿いの国道で増水のためバスが立ち往生し，乗客は翌日の朝に救助されたが，浸水深はバスの天井を超えて，屋根の上に避難していた乗客の腰まで達し，間一髪の状態であった．早期に判断・行動が重要だという教訓である．

また，2008年7月に兵庫県神戸市の都賀川で，集中豪雨によって増水した川で小学生・保育園児を含む5名が流される水難事故が発生した．急に雨が降ってきて橋の下で雨宿りをしていた時に，急激な増水が引き起こした事故である．「雨が降れば，早急に水辺から離れろ」という教訓を改めて思い起こさせる事例である．このように，既往の事例は多くの教訓を残し，大雨注意報は発表された時には，自分がどこにいるのかを自覚しておくことが備えになり，自分を守ることになるという点を認識する文化となることが期待される．

最後に，大雨時には，危険性を含んでいることを知識として身に付け，平常時には地下鉄，地下街など地下空間を大いに利用して頂きたいと願っている．

参考文献

1）井上和也・戸田圭一・中井勉・竹村典久・大八木亮：地下空間への浸水過程，京都大学防災研究所年報，第46号B，平成15年.
2）石垣泰輔・戸田圭一・馬場康之・井上和也・中川一：実物大模型を用いた地下空間からの避難に関する実験的検討，水工学論文集第50巻，土木学会水工学委員会，pp.583-588, 2006.
3）馬場康之・石垣泰輔・戸田圭一・中川一：水没した自動車からの避難に関する体験実験，地下空間シンポジウム論文・報告集第14巻，土木学会地下空間研究委員会，pp.153-158, 2009.
4）後藤恵之輔・戸田圭一・中山学：地下空間に関わる浸水被害事例とその対策，地下空間シンポジウム，地下空間シンポジウム論文・報告集 第5巻，土木学会地下空間研究委員会，2000.