

浸水建物における効率的乾燥手順の立案に関する研究

信州大学工学部建築学科 助教 中谷岳史

概要：

本研究は水害被害を受けた建物の効率的復旧手順の立案を行い、実際の被災住宅で検証することで減災を目的にする。実際の被災建物を対象に技術支援し、同時にデータ収集を行った。調査対象は令和元年の長野県長野市、令和2年7月の熊本県相良村、令和3年春の千葉県市川市の3か所の被災住宅である。

長野県の床上浸水した建物では、室内壁の部分解体、床下乾燥を行った。床は解体せず、床下空間は清掃を省略した。その代わりに工業用ファンを床下に設置し、室内から床下、床下空間の攪拌、床下から屋外に排気する換気経路をつくり、迅速に乾燥できた。含水率や浮遊真菌の観点から有効性が確認できた。熊本県の床上浸水した建物では作業工程を分析した。立案手法は現実的かつ有効な作業手順であることが確認された。千葉県の床下浸水した建物では、床下空間の清掃を省略し、乾燥を優先する手法を施行した。床下空間の浮遊真菌濃度を低く抑えられ、有効性が示唆された。

キーワード: 水害, 建物, 復旧, 乾燥

1. 背景目的

近年、台風や大雨による水害被害が顕在化しており、適応策の観点から浸水建物の効率的乾燥手順の立案が求められている。建物浸水後は、含水した木材や断熱材が乾燥できずに一定期間が経過すると、真菌の爆発的増加による室内の生物汚染が懸念される。浸水部位の撤去と清掃、そして迅速な乾燥と室内換気が重要になる。しかし現在の日本では復旧手順が定まっておらず、技術開発も不十分である。日本建築学会の水害に対する提言書では、対策の遅れが問題提起されており、社会的要請の高い課題である。浸水建物の復旧ガイドラインはアメリカが有名であり、EPA¹⁾やNCHRP²⁾などの公的機関が発行してきた。但し海外と日本では住宅の形状が異なること、日本で多くみられる狭い床下空間の取り扱いが記載が不十分である。日本国内では浸水建物の復旧は研究対象に殆どされておらず、学術的知見に基づいたガイドライン策定が求められる。

本研究は浸水建物を対象とし、効率的な乾燥手順の立案を目的とする。実際の被災建物を対象に立案した復旧手順に基づいて技術支援し、同時にデータ収集を行う。また後日、比較対象の住宅の情報を集め、立案した浸水対策の有効性確認と改善点の抽出を行う。水害現場では調査自体が困難であり、類似の研究事例は国内では殆どない。被災直後の減災につながる復旧手順を検証する点で、研究の意義が大きい。

2. 研究概要

調査方法は、水害による被災現場の技術支援と実態調査である。調査対象は令和元年東日本台風で被害を受けた長野県長野市、令和2年7月豪雨の熊本県相良村、令和3年春の千葉県市川市の住宅である。災害技術支援と情報収集を平行することで、被災直後から数か月後まで時系列で記録や測定を行った。3章では令和元年東日本台風で半壊判定された住宅2戸を対象に、通気システムの作動有無で比較した。被災直後から写真や含水率分布、真菌の程度、温湿度などを記録した。4章では令和2年7月豪雨で全壊判定をうけた熊本県相良村の住宅2戸を対象に、作業手順の効率化の観点から工程分析を行った。5章では千葉県市川市の床下浸水の住宅2戸を対象に、床下空間の処理の観点から現場調査を行った。

3. 研究概要

3. 1 令和元年東日本台風の調査

本調査では、長野県長野市内の住宅を対象とした衛生環境に関する実測調査を実施し、居室と床下の温湿度、真菌濃度、MVOC濃度等の推移を観察しながら衛生環境を評価する。特に、被災直後の処置の有無がその後の衛生環境にどのような差異をもたらすかに注目した。

本報告の調査対象住宅は、戸建住宅(N邸)と集合住宅(AP

邸)である(図1)。いずれも木造であり、壁はグラスウールの充填断熱、床はポリエチレン系断熱材による床断熱である。N邸には土間コンクリートがなく、AP邸には土間コンクリートがあった。建物が所在する長野県長野市篠ノ井会地区は、千曲川北側に位置する。2019年10月13日未明に塩崎地区や横田地区で越水し、午前1時から2時にかけて1階床面に流入した。浸水深さは道路から1m、1階床から30cmである。建物の浸水時間は12～24時間であり、室内だけでなく、床下空間に大量の水分が蓄積された。N邸は10月14日から復旧活動を開始したのに対し、AP邸は室内空間・床下空間共に放置された。室内空間(図2)は、被災直後から復旧を行った。またトイレや洗面空間の床のクッションフロアを除去した。床の断熱はポリエチレンであり、脱落や顕著な含水がなかった為、経過観察した。壁は、石膏ボードと充填断熱(グラスウール)を除去した。十分な乾燥後に構造用合板や構造材を消毒して、復旧した。床下空間は、N邸に被災2日目に1階床と床下空間の間にファンを設置した(図3)。外→室内→床下→外の換気経路を確保することで、床下空間乾燥と汚染物質の拡散防止を意図した。表面の濡れは、約2週間で解消された。

建物浸水後の復旧作業の効果を検討するため、図4にN邸とAP邸における3か月後の鉛直方向の木材含水率を示す。N邸の含水率は10%代であり、乾燥傾向が確認できる。またAP邸でも浸水していない外皮や間仕切り壁の含水率は低い。一方でAP邸の浸水域である0.0m～0.3mの外皮の含水率は高く、最大で40.6%、中央値で22.2%であった。外皮の壁はいずれの建物もグラスウールが充填されており、N邸では壁部分解体によってグラスウールを除去したことが乾燥に効果的であった。なおAP邸は復旧作業が行われていなかった為、浸水域のクロスや石膏ボード表面に大面積でカビの発生が目視で確認された。

N邸とAP邸を対象に各室の浮遊真菌濃度を測定した。測定箇所は、N邸では居間、階段下収納、床下の3か所、AP邸では居間、床下の2か所である。浮遊真菌濃度はエアサンプラーにてPDA培地(好湿性真菌用)とDG18培地(好乾性真菌用)に吸引採取(空気量100リットル)した後、25℃にて5日間程度培養し、コロニー数をカウントした。また、真菌の形態観察により真菌種・属を同定した。日本建築学会環境基準AIJES-A0002で提案された一般住宅の管理基準は浮遊真菌濃度が1000 CFU/m³を判定に用いた。被災から一か月段階の結果を図に示す(図5)。N邸の浮遊真菌濃度は基準値以下であるのに対し、AP邸ではやや超過していた。AP邸の室内空間はカビによって汚染されており、含水率が高いことや居住者がいないこと、窓を閉め切っていることから、埃が飛散していないことから、数値以上の汚染であることが推察される。

本研究から推察される効果的復旧手順を整理する。室内空間は浸水した家具や建具などを屋外へ搬出し、室内空間の清掃消毒と乾燥を早急に行う必要がある。また洗面やト

イレなどに用いられるクッションフロアは、乾燥を阻害する為、取り除かなければいけない。壁は、浸水水位に30cmを加えた部位の断熱材と石膏ボードを取り除かなければいけない(図6)。繊維系断熱材や石膏ボードが乾燥するには時間がかかり、カビがほぼ確実に発生する。また独立気泡の発泡系断熱材であったとしても、構造用合板や柱を乾燥させる必要があるため、断熱材の除去は必要である。浴室や洗面空間、造作家具など部分解体が難しい箇所は、早期に建築技術者に対応を依頼すべきである。床下空間は水をポンプで排出した後、室内空間の空気を床下へ送風することが有効である(図7)。移動式ファンを1階床点検口に配置して、室内空間を負圧、床下空間を正圧にすることで、外気→室内→床下→外気の換気経路を形成できる。居室空間全体に外気の新鮮空気を取り込み、汚染物質の拡散を抑制すること、また1階空間と床下空間を換気経路にすることで乾燥の促進が期待できる。早期設置ができれば、床下空間の清掃を省略できる可能性が高い。

3. 2 令和元年東日本台風の調査

本研究の対象地域は熊本県球磨郡相良村であり、熊本県の南部に位置する農山村である。令和2年7月豪雨災害では、球磨川や球磨川の支流である川辺川の氾濫により、村内の広範囲での浸水被害が発生した。建物被害は住宅182棟、また住宅以外(倉庫等)220棟、計402棟であった。本研究の対象である全壊及び大規模半壊と認定された住宅は40棟であり、被害を受けた住宅の22%であった。また、全壊と大規模半壊の住宅は川辺川と球磨川の沿川の浸水区域内に集中しており、浸水深が1階床上3m近く到達した箇所もあった。相良村では2020年7月3日午後11時に警戒レベル4の避難勧告が発令され、浸水発生時、住民は避難を完了していた。被災直後から対象地一帯で停電が発生し、2020年7月11日に復旧した。本研究では相良村の西村地区に位置する0邸とN邸の2軒の住宅を対象とした。対象住宅は2020年7月4日未明に浸水被害が発生し、浸水時間は24時間以内であった。本研究では復旧の工程を時間軸で整理するために、作業期間や人工について明らかにする。壁の解体を優先した0邸の作業内容や作業期間、作業に必要な人工を整理する。次に長期的な復旧について床解体の有無による違いを整理する。0邸とN邸を比較し、復旧作業の期間や人工の違いについて述べる。大人1人が作業に1日を要する仕事を1人工とした。

表1に0邸の被災後1年間の復旧工程表を示す。0邸が2ヶ月以内の復旧作業に要した総人工数は101人工であった。室内は15人工、床表面は26人工、壁は33人工、床組は20人工であった。室内及び床表面の作業に要した41人工であり、その人工数は総人工数の約40%であった。壁の部分解体は被災後2週間以内に作業の大部分が完了し、自然乾燥を行った。壁解体を開始する時点で目視によって



図1 室内空間の復旧（被災後1日目）



図2 室内空間の復旧（被災後2～4日目）



図3 床下空間の復旧（被災後2～16日目）

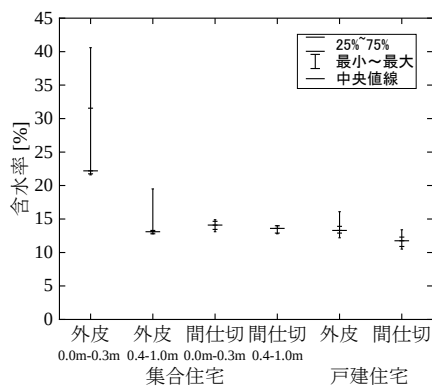


図4 戸建住宅(N邸)と集合住宅(AP邸)の各部位の含水率分布

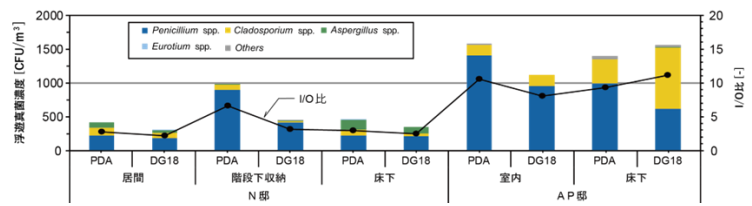


図5 真菌濃度の測定結果(2019年11月測定)



図6 壁内部空間の復旧（被災後16～23日目）

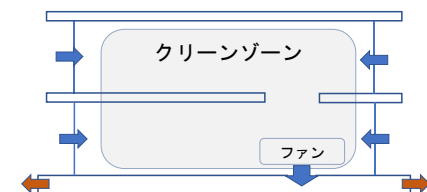


図7 提案する換気システムの概要

カビが確認された。床組は壁の解体が終わった後、大引きや根太の含水率計測と目視によって状態を把握した。床下は被災後2ヶ月間にわたり送風機を用いて乾燥を行い、その後自然乾燥を行った。被災後2ヶ月目から8ヶ月目は躯体の乾燥を行った。修理は被災7ヶ月後である2021年2月末から行われた。修理に要した総人工数は62人工であった。床面は工事業者によって脱落した断熱材の固定や撤去部分における断熱材の補充、床の張り替えの作業が行われた。壁面は工事業者によって断熱材の補充や石膏ボードの施工の作業が行われた。その後、住民が約2ヶ月間クロス貼りの作業を行った。

表2に被災後1年間のN邸の取り組みを示す。N邸は被災後1ヶ月間で室内、床組、壁の順に解体作業を行い、被災から2ヶ月目に床下の作業を行った。N邸が住民主体の復旧作業に要した総人工数は140人工であった。室内は15人工、壁は37人工、床組は37人工、床下は46人工であった。床表面は床解体を行ったため人工が発生しなかった。室内は家財の搬出作業を行った。床組は住民と知人によって床板の解体作業が行われた。壁は住民と知人によって間仕切壁のみ解体作業が行われた。壁解体を開始する時点において、目視でカビが発見された。外壁は解体時に工事業者がいない為に解体できなかった。砂壁は解体せず自然乾燥を行った。また床解体の後に壁解体を行ったため、住民は床板がないことによる作業性の低さや根太を跨ぎながら移動することに転倒の危険を感じた。壁は解体後から修理が始まるまでの約6ヶ月半の間、自然乾燥を行った。床下は住民とボランティアにより約2週間、泥だしと清掃の作業が行われた。泥だしを開始する時点では泥は乾いておらず、粘土のような状態であった。床下は清掃と消毒の後、修理を始めるまでの1ヶ月間、送風機を用いて乾燥を行った。修理を始めた時、床組は乾燥していた。修理に要した総人工数は49人工であった。床は2020年10月から工事業者によって作業が行われた。壁と建具は工事業者によって2021年2月に行われた。

O邸とN邸は異なる順で解体作業を行い、乾燥期間を経て修繕を行った。復旧作業に要した期間はO邸が11ヶ月間であり、N邸は8ヶ月間であった。O邸はN邸に比べ長期間の自然乾燥を行ったため、復旧作業の終了が遅かった。室内の解体・搬出作業は2軒とも15人工程度を要した。室内空気質の観点から室内の作業は被災直後に必ず行い、早期に解体作業を行うため数日から2週間以内に作業を終える必要がある。しかし、短期間に住民のみで作業を行うことは困難である。よって、早期に応援要請を出し作業人員の確保が求められる。壁と床組の作業は解体順序が異なっていたことで作業の容易さに違いがあった。O邸は壁解体を行う際、床板があることにより安定して作業を行うことができた。一方で、N邸は足場が不安定な状況で壁解体を行っており、作業が容易ではなかった。また、O邸は工事業者が解体作業を行ったが、N邸は工事業者がいなかったた

め一部の壁の解体を行うことができなかった。これより、安全面の観点から壁・床の順に作業を行うことが望ましく、建築についての有識者の有無により作業効率が異なると考えられる。床下はO邸が2ヶ月間の送風機を用いた乾燥後、自然乾燥を行ったのに対し、N邸は泥出しを行った後、1ヶ月間送風機を用いて乾燥を行った。N邸は床下の泥を撤去したため、1ヶ月間の送風で乾燥したと考えられる。しかし、床下の作業には46人工必要であったことから多くの人員が必要であると考えられる。また、泥出し時は解体時に清掃した根太や大引きなどが汚れるため、再度床組の清掃が必要であった。人員確保や作業量削減の観点から床下は床を解体せず、送風機による乾燥が望ましい。

3. 3 令和3年3月の千葉調査

千葉縣市川市で床下浸水被害を受けたA邸とB邸を対象に、床下空間の清掃を省略し、送風機を用いて換気と攪拌を行うことで乾燥を促進させた。有効換気量と表面含水率の調査を行い、送風機による床下送風の有効性を検討した。また床下の浮遊真菌数の測定を行った。

対象住宅周辺では2021年3月13日の14時と16時付近で強い雨を観測し、浸水被害が発生した。浸水規模はいずれも床下浸水であり、浸水深さは、床下の基礎部からA邸20mm程度、B邸が10mm程度であった。2邸送風機を用いて床下換気と床下空気攪拌を行って乾燥を行った。送風機は、直径250mm、風量50m³/minのものを使用した。送風時は、点検口から室内空気を誘引し、床下換気口から外気に排出するようにした。A邸は2021年3月15日から2021年4月17日にかけて4台の送風機を稼働させた。B邸は2021年3月15日から2021年4月16日にかけて2台の送風機を稼働させた。A邸は乾燥状況により送風機の向きを調整したが、B邸は行わなかった。A邸の床下空間に対して十分な送風を行い、B邸は不十分であった。

測定項目は、有効換気量と表面含水率、浮遊真菌数を測定した。有効換気量の測定は、トレーサガス濃度減衰法を用いて1か月後の測定時にA邸の床下で行った。トレーサガスとして二酸化炭素を使用した。攪拌状態で床下の初期濃度を10,000ppmに達するようにドージングし、マルチガスモニター(INNOVA, 1312 Photoacoustic Multi-gas Monitor)を用いて30秒おきの濃度測定値から有効換気量を算出した。図8に有効換気量測定の検討条件を示す。床下点検口を閉めて床下空間の攪拌の無い自然換気の状態を条件1、床下点検口を開けて床下空間を送風機で攪拌する状態を条件2、床下空間に置いた送風機の1台にエアダクトを装着して室内空気を床下空間に誘引する状態を条件3とし、各々の有効換気量を測定した。エアダクトは直径250mm、コード長450mmのものを使用した。また、条件3の場合は床下点検口を通過するエアダクト以外の隙間はビニールで目張りして測定した。

表1 提案する換気システムの概要

	日付	2020年 7月	8月	9月	10月	11月	12月	2021年 1月	2月	3月	4月	5月	6月
	総人工数	15											
室内	解体・搬出	15											
床表面	清掃	19											
	消毒	7											
壁	除去・解体	8											
	清掃	14											
	消毒	7											
	木材保護	4											
	乾燥												
床組	設置	1											
	解体・搬出	7											
	清掃	5											
	消毒	4											
	木材保護	3											
床下	清掃	7											
	乾燥												
修理	床面	20											
	壁面	36											
	建具	6											

表2 提案する換気システムの概要

	日付	2020年 7月	8月	9月	10月	11月	12月	2021年 1月	2月	3月	4月	5月	6月
	総人工数	15											
室内	解体・搬出	15											
床表面	清掃												
	消毒												
壁	除去・解体	20											
	清掃	10											
	消毒	7											
	木材保護												
	乾燥												
床組	設置												
	解体・搬出	20											
	清掃	10											
	消毒	7											
	木材保護												
床下	清掃	34											
	消毒	12											
	乾燥												
修理	床面	43											
	壁面	4											
	建具	2											

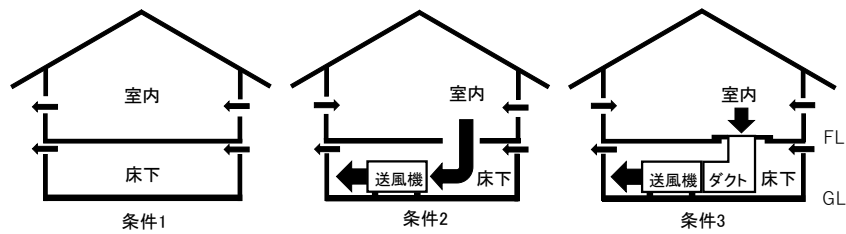


図8 換気システムの設定条件

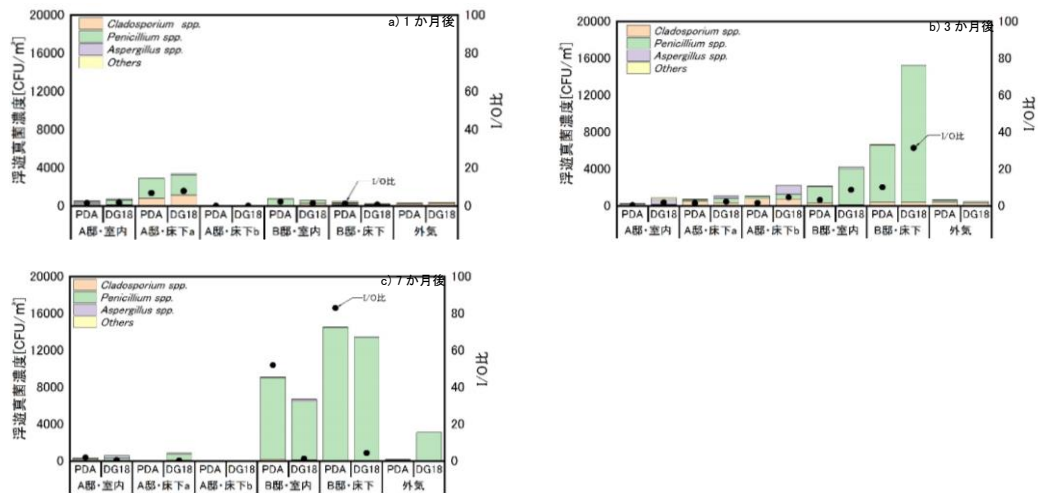


図9 各測定日の浮遊真菌濃度

表面含水率と浮遊真菌濃度の測定は、浸水から1か月後の2021年4月17日と3か月後の2021年6月22日、そして7か月後の2021年10月10日に行った。以後1か月後、3か月後、7か月後と表記する。表面含水率はコンクリート・モルタル水分計 (Kett, HI-520-2) を用いて、床下の土間コンクリートの表面近傍の含水率を測定した。一か所につき3回計測を行い、平均値を記録した。浮遊真菌濃度の計測は、エアサンプリング法で行った。エアサンプラー (ミドリ安全, BIOSAMP MBS1000) を用いて測定したサンプリング流量100 L/min, サンプリング量100LでPDA培地とDG18培地に吸引採取した。その後、25℃にて5日間程度培養し、コロニー数をカウントした。また、真菌の形態観察により真菌属を同定し、1 m³に換算して浮遊真菌濃度とした。外気濃度に対する室内濃度の比率であるI/O比を求めて、室内に浮遊する物質の汚染レベルを評価した。また、日本建築学会環境基準AIJES-A0002-2013をもとに評価を行った。一般住宅の管理基準は浮遊真菌濃度が1000 CFU/m³である。

送風機による有効換気量を測定した。換気回数は条件1で3.1回/h、条件2で5.9回/h、条件3で7.1回/hであった。このことから送風機の使用で換気回数2.8回/h分の効果があり、送風機とエアダクトの併用により換気回数4.0回/h分の効果があると考えられる。送風機及びエアダクトを使用して床下に室内空気を誘引し、床下空気を攪拌することによって有効換気量は増加することが示された。有効換気量を増加させることにより、床下空間の湿度を低下させて効率的に床下乾燥を行えると考えられる。またダクトを省略しても、十分な換気回数が得られた。以上のことから浸水後の処置として床下空間に送風機を設置することで室内空気を誘引し、床下換気や攪拌を行うことは効率的である。

コンクリートの表面含水率の計測を行った(図9)。A邸の床下全体の平均表面含水率は1か月後から7か月後までほとんど変化していないため、1か月後には全体的に乾燥していることが示唆された。B邸の床下全体の平均表面含水率は3か月後から7か月後にかけて減少しており、最大値と最低値の差も大きいため、場所によって乾燥速度にばらつきがあり、乾燥の遅い場所は3か月以上乾燥に時間を要していることが示唆される。したがって、送風機を十分な台数使用して床下換気や攪拌を行うことにより、床下を全体的に乾燥できると考えられる。

床下の浮遊真菌濃度を測定して床下環境を調査した。各測定点での浮遊真菌濃度とI/O比を図10に示す。A邸は、床下aで1か月後にPDA培地が2,895d CFU/m³、DG18培地が3,360 CFU/m³と濃度範囲を超えていたが、時間経過に伴い減少の傾向が見られた。B邸は1か月後で室内と床下ともに範囲内であったが、7か月後にかけて増加して全測定点で範囲を超えた。浸水直後に送風機を用いて床下全体を迅速に乾燥させたA邸は浮遊真菌濃度が時間経過により減少したため、床下乾燥を優先して応急処置を行うことは

効果的であることが示唆された。しかし、B邸は送風機の台数制限があったため乾燥に時間がかかり *Penicillium* spp. が爆発的に増加した。*Penicillium* spp. はアレルギーとして重視される真菌であり、健康リスクが増大するため、清掃や消毒は必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究は水害被害を受けた浸水建物を対象に、現実的かつ効率的な復旧手順を立案して、実際の被災住宅で検証することで減災を目的にする。実際の被災建物を対象に技術支援し、同時にデータ収集を行った。また後日、比較対象の住宅の情報を集め、立案した浸水対策の有効性確認と改善点の抽出を行った。調査対象は令和元年東日本台風で被害を受けた長野県長野市、令和2年7月豪雨の熊本県相良村、令和3年春の千葉県市川市の住宅である。

長野県の床上浸水した建物では、室内壁の部分解体、床下乾燥を行った。室内壁は石膏ボード表面とクロス、土壁などで真菌類が増殖しやすいことから、速やかに部分解体、清掃を行った。また床は解体せず、床下空間は清掃を省略した。その代わりに工業用ファンを床下に設置し、室内から床下、床下空間の攪拌、床下から屋外に排気する換気経路をつくり、迅速に乾燥できた。含水率や浮遊真菌の観点から、有効性が確認できた。

熊本県の床上浸水した建物では、作業工程を分析した。立案した手法は、床と床下空間を工業用ファン設置だけで簡略化し、カビによる生物汚染が拡大する前に室内空間の清掃消毒に取り組むことができ、現実的かつ有効な作業手順であることが確認された。また従来の床解体や床下清掃は作業量が非常に大きく、最初の段階で着手すると室内空間の壁解体が遅れ、室内空間で生物汚染が生じる危険性が確認された。また初期段階で床解体を行うと自宅避難の選択肢がなくなる。当初は仮設住宅が開設されていないことから、災害に対して脆弱な体制になることが懸念される。千葉県の床上浸水した建物では、床下空間の清掃を省略し、乾燥を優先する手法を施行した。工業用ファンにより、室内から床下、床下空間内を攪拌、そして床下から屋外に排気する換気経路を形成した。工業用ファンを床下に設置するだけで、床下空間は約3回/hの換気回数が得られた。また床下空間の浮遊真菌濃度を低く抑えられ、床下空間の乾燥優先の有効性が示唆された。

参考文献

- 1) EPA: Flood Cleanup and the Air in Your Home, 2017
- 2) NCHH: Flood Guide: A Field Guide for Flooded Home Cleanup, 2019.