

# 数値計算に基づく新潟県糸魚川市における 大規模火災の延焼拡大要因の分析

岩見 達也

国立研究開発法人 建築研究所 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

2016年12月22日に新潟県糸魚川市で発生した市街地火災に関して、被害が拡大した要因を明らかにすることを目的として調査・分析を行った。火災当時の空撮映像等から、建物毎の延焼時刻及び飛び火地点15カ所を確認した。また、市街地に建つ建物の構造が異なる場合の延焼状況の違いをシミュレーションを用いて分析し、木造建物を防火構造とすることで飛び火が生じにくいこと、さらに瓦屋根を現代仕様とすることで、飛び火がほとんど発生せず焼損棟数が一層少なくなることを確認した。

キーワード 市街地火災, 延焼動態, シミュレーション, 飛び火, 瓦屋根

## 1. 背景及び目的

2016年12月22日に新潟県糸魚川市で発生した市街地火災は、焼損棟数147棟、負傷者数17名を数える大規模な被害をもたらした。市街地火災によってこれほどの被害が発生したのは、地震時以外では1976年に山形県酒田市で発生した酒田大火以来となる。

筆者らは今回の火災による被害状況に関して調査・分析を進めてきた<sup>1)</sup>。本稿では、被害が拡大した要因を明らかにすることを目的として、火災当時の空撮映像等から、建物毎の延焼時刻、飛び火の発生状況等を推定した結果、及び、市街地に建つ建物の構造が異なる場合の延焼状況の違いについてシミュレーションを用いて分析を行った結果を報告する。

## 2. 糸魚川市大規模火災の概要と延焼状況の推定

### (1) 焼損区域の概要

火災は2016年12月22日10時20分ごろに発生し、風速10 m/s以上の南風によって北方向へ大きく燃え広がった。焼損区域は海沿いまで到達し、南北方向に約300 m、東西方向に約200 mにわたる約40,000 m<sup>2</sup>の区域が焼損した。焼損区域は1960年に全域が準防火地域に指定されており、指定以降に建築される木造建物に対しては、建築基準法により外壁・軒裏を防火構造とし開口部に防火設備を設けることが求められているが、それ以前に建築されたと見られる古い建物も多く確認されている。

### (2) 延焼状況の推定

今回の火災の延焼状況に関しては、糸魚川市消防本部によって消防活動記録に基づく延焼方向や延焼時刻が報告されている<sup>2)</sup>ほか、報道機関や公的機関によってヘリコプター等から火災時の空撮映像が記録されている。これらの資料に基づいて、個別建物に延焼した時刻を推定するとともに、隣接する周囲の建物が燃焼していない(あるいは強い加熱を受けるほどの激しい燃焼ではない)にもかかわらず、建物から煙や火炎の噴出を確認できたものを飛び火と見なして、15カ所の飛び火地点を特定した。図1に延焼動態の推定結果を示す。

この15地点の建物を見てみると全てが木造2階建ての建物であり、このうち13地点は1936年以前建築であった。さらにこのうち少なくとも10地点の建物の屋根は空中写真を用いた判読により昭和初期に一般的であった仕様(以下、「昭和初期仕様」という。)の瓦屋根であることが推定された。昭和初期仕様の瓦屋根は、現代の仕様(以下、「現代仕様」という。)に比べて、瓦の寸法精度が低く瓦下の防水層の材料が燃えやすいこと等により火の粉が瓦の隙間から侵入して飛び火が発生しやすいことが実験により確認されている<sup>3)</sup>。このような古い木造建物が混在していたことが延焼被害の拡大に大きく影響したと考えられる。

## 3. 市街地火災シミュレーションによる分析方法

### (1) 分析の目的と方法

今回の火災の焼損範囲は準防火地域に指定されていた

ものの、古い建物が多く、準防火地域の木造建物に対して求められる性能を有していない建物が混在していたことが推定された。そこで、全ての木造建物が準防火地域において求められる性能を有する場合等の延焼性状を確認するため、市街地火災シミュレーションを用いた検討を行った。



- \*1 映像により初めて状況が確認できた時点で燃焼しており、当該領域が燃焼を開始した時刻は確認できていない。
- \*2 13:42の映像により当該領域中央付近において発炎を確認。
- \*3 14:20の映像により当該領域南端付近において発炎を確認。

図1 映像・画像等から推定した延焼動態

シミュレーションは国土技術政策総合研究所及び建築研究所が開発した市街地火災シミュレーションプログラム<sup>3)</sup>を用いた。このプログラムでは建物(1棟以上)の情報(形状、階数、構造)を市街地データとして入力し、出火点、風向・風速を設定すれば、出火以降の時々刻々の火災性状が計算される。本計算により各建物の延焼時刻の他、各建物の詳細な火災性状(火災室内の温度や発熱速度等)が得られる。今回の火災では飛び火が多数確認されており、飛び火の影響を含めた延焼性状を確認する必要がある。シミュレーションプログラムにおける飛び火モデルの概要を以下に示す。

#### (2) 飛び火モデル

飛び火の発生機構は未解明な部分が多く、現在もさまざまな研究が取り組まれている途上にあるが、今回用い

た飛び火モデルは、過去の実験や観測を踏まえて以下の設定に基づいたモデルを採用している。

- ① 燃焼建物から放出される火の粉の発生量(単位時間あたりの発生質量)は、当該建物の発熱速度に比例する。
- ② 火の粉の分布は、風向に平行方向風下側には発生源を原点とした対数正規分布に、風向に直交方向には正規分布にそれぞれ従う。
- ③ 火の粉落下後は、指数関数に従って質量が減少(1分間あたり質量が20%減少)する。
- ④ 火の粉による単位時間あたりの延焼確率(以下、1分間あたりの火の粉による延焼確率を「飛び火確率」という。)は、屋根面に降積した火の粉の当該時刻における残存質量に比例する。

①の比例係数は発生量に関する係数であるが、発生した量の火の粉が風下側に分布することから最終的には風下側建物の屋根面に降積する火の粉の密度に対する比例係数(さらに言えば、風下側建物の屋根面に降積した火の粉の残存質量に対する比例係数)となる。このため、風下側の各建物の飛び火確率は、①の比例係数と④の比例係数の積(以下、①の比例係数と④の比例係数の積を「飛び火係数」という。)を比例係数とする式に置き換えることができる。この飛び火係数は、過去の市街地火災で観測された延焼速度と計算による延焼速度が比較的良く合うように調整して求めたが、今回の火災で観測された飛び火の発生地点数より計算によって得られる飛び火発生地点数が著しく少ない傾向が見られたことから、過去の市街地火災に基づく係数を50倍した値に設定することで調整した。

なお、今回の火災では空撮映像等によって建物単位の詳細な延焼状況及び飛び火の状況が確認されたが、過去の市街地火災時には今回の火災で得られたような詳細な情報を得ることは困難であったことが考えられ、そのために、過去の記録に基づいて設定した飛び火係数では今回の火災の飛び火性状を十分再現できなかった可能性が考えられる。

#### 4. 計算条件

シミュレーション用の市街地データとして、現地の火災当時の建物の状況を再現した市街地データ(以下「再現市街地データ」という。)を図2のとおり作成した。データ作成範囲は、図2の実線枠内の範囲であり、今回の火災で焼損の激しかった建物の範囲(破線枠内)から1ブロック程度拡張した範囲とした。

建物形状は糸魚川市より提供を受けた地形図データ(シェープ形式)に基づいて作成し、建物属性(構造及

び階数)は現地調査、Web等の写真画像及び特定行政庁より提供を受けた建築確認データに基づいて推定した。

出火建物は実際の火災で火元となった建物に設定し、出火から6時間後までの計算を行った。風向及び風速は南風(真南から11度東寄り) 12.5 m/s(アメダス観測所(糸魚川)における火災当時の出火から3時間の平均風速)とした。真南から11度東寄りとした理由は、火災時の空撮映像から煙が国道8号にほぼ直交する方向に流れていたことから図上計測により国道8号に直交する角度を11度東寄りと確認したことによる。



図2 再現市街地データの範囲及び建物構造

表1 構造別建物棟数

構造	建物棟数	
	データ作成範囲 (図2実線枠内)	焼損の激しい範囲 (図2破線枠内)
耐火	17	7
準耐火	40	22
防火構造	91	56
裸木造	202	121
計	350	206

建物構造は、図2に示した再現市街地(以下「市街地①」という。)を基本ケースとして、以下に示す一部の建物構造を変更した2種の仮想的な市街地データを作成し、それぞれの延焼状況を比較した。

i) 裸木造建築物が、全ての外壁面及び開口部に防火措置を施した防火構造建築物となった場合を想定した市街地(以下「市街地②」という。)

i i) 上記 i) に加えて、全ての防火構造建築物の屋根

の仕様が現代仕様であると仮定して、市街地①及び市街地②に比べて飛び火係数を1/40倍に低減した市街地(以下「市街地③」という。)

飛び火係数の倍率1/40は、以下の仮定に基づいて式(1)により求めた。

a) 別途実施した火の粉による出火実験においては昭和初期仕様の屋根に比べて現代仕様の屋根では炭化痕の数が1/80であった。炭化痕の数の比は必ずしも飛び火確率の比そのものではないが、炭化痕の数は火の粉の侵入の可能性と火の粉侵入後の野地板等の燃え抜けの可能性を含めた飛び火に対する抵抗性を示した結果と考えられることから、飛び火確率が炭化痕の数に比例すると見なして、屋根仕様の違いによる木造建物の飛び火確率が1/80であると仮定

b) 今回の火災時に昭和初期仕様の屋根がどの程度の割合で混在していたかは不明であることから、昭和初期仕様の屋根と現代仕様の屋根が1/2ずつであったと仮定

$$k = \frac{\text{市街地③の木造建物の飛び火確率}}{\text{市街地①及び市街地②の木造建物の平均飛び火確率}}$$

$$= \frac{b}{xa + (1-x)b} = \frac{r}{x + (1-x)r} \approx \frac{1}{40} \quad (1)$$

k : 市街地①及び市街地②において設定する飛び火係数に対する市街地③において設定する飛び火係数の比

a : 昭和初期仕様の瓦屋根の飛び火確率

b : 現代仕様の瓦屋根の飛び火確率

x : 市街地①及び市街地②における、木造建物のうちの昭和初期仕様の瓦屋根の建物の割合 (=1/2)

r : 昭和初期仕様の瓦屋根の飛び火確率に対する現代仕様の瓦屋根の飛び火確率の比 (=b/a=1/80)

計算対象のデータ範囲は、データ作成範囲全域(実線枠内)を対象とした範囲と図2の破線枠内のみを対象とした範囲の2種類を設定した。以上により、建物構造3種の市街地(市街地①~③)に対してそれぞれ計算対象のデータ範囲を2種設定し、計6種(Case1~Case6)の計算を行った(表2及び表3)。

表2 計算条件

出火点	今回の火災の火元建物
風向・風速	南風(真南から11度東寄り) 12.5 m/s
計算時間	出火から6時間
建物構造	市街地①、市街地②、市街地③の3種
計算対象範囲	図2実線枠内、図2破線枠内の2種



表3 計算条件の組み合わせとケース名称

建物構造		市街地 ①	市街地 ②	市街地 ③
計算 対象 範囲	実線枠内 (データ作成範囲全域)	Case1	Case2	Case3
	破線枠内 (消防活動を想定)	Case4	Case5	Case6

なお、計算対象のデータ範囲を図2の破線枠内のみとした場合の計算は、消防活動によって周囲への延焼が阻止されることを想定したものである。今回の火災による焼損区域は、消防活動等によって周囲への延焼が阻止された結果としてできた区域であることから、今回の火災時に行われた消防活動と同程度の消防活動が行われる状況を計算するために、計算対象のデータ範囲を焼損の激しい範囲に限定した。

また、糸魚川市消防本部によれば、出火点のある街区から東側街区への延焼は、一旦北方面へ延焼が進んで街区北端付近で東側街区へ延焼し、その後東側街区を南向きに延焼が進んだとされている。同様の証言は現地の周辺住民へのヒアリングでも確認された。出火点周辺ではこれらの街区間では消火活動が行われたために延焼が阻止されたと考えられる。火災初期の延焼性状の違いは火の粉の発生源となる燃焼建物数の違いでもあり、市街地全体の火災性状への影響が極めて大きいことから、消防活動を想定した赤枠内のみを対象とした計算においては、出火点のある街区とその東側街区間の延焼が街区北端部以外では発生しないように設定した。

## 5. 計算結果と考察

### (1) データ作成範囲全域を対象とした計算

シミュレーションでは飛び火の発生する時刻や場所はランダム性があるため、計算ごとに異なる結果となることから、各市街地それぞれ100回ずつの計算を行った。図3～図5は100回の計算を行ったうちの典型的な1回の計算結果をCase1～Case3それぞれについて一例として図示したものである。また、100回の計算を行った結果を集計し、経過時間ごとに焼損棟数の最大及び平均を求めた結果を図6に示す。

Case1では出火から早期に広範囲に延焼が及んでおり、これが大量の火の粉を発生する原因となって飛び火の発生を助長して急速に火災が拡大する様子がかがわれる。飛び火計算のランダム性により計算ごとに延焼棟数の増加速度に差はあるが、4時間後には平均でも市街地のほぼ全ての建物が焼損する結果となった。

Case2では火元建物とその周囲の防火性能が向上して

いるため、出火から1時間では数棟の火災に止まっている。広範囲に延焼が及ぶのは3~4時間経過後でありその頃から徐々に飛び火が発生し始めるが、飛び火した建物やその周囲の建物の防火性能が向上していることから、延焼範囲の拡大は緩慢で6時間経過時点でも延焼が及んだ建物の割合は平均で1/3程度、最大でも1/2程度に止まっている。Case3では飛び火があったのは100回の計算中8回のみであり、ほとんどの計算で図5に示す延焼範囲に止まる結果となった。なお、飛び火はCase1では100回の計算中100回、Case2では100回の計算中98回で発生した。

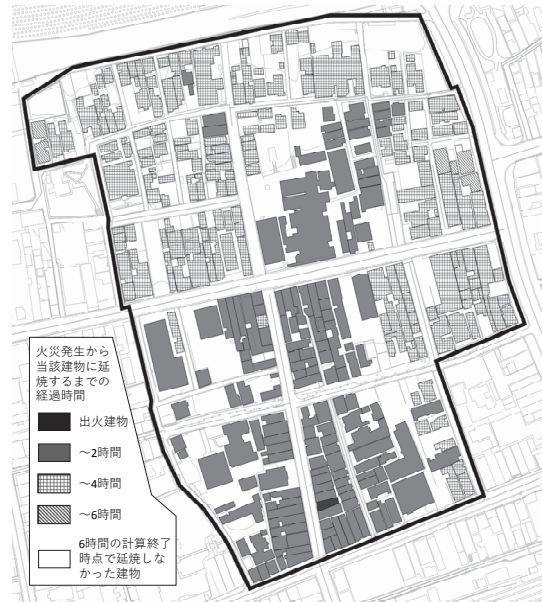


図3 Case1の計算結果の一例  
(再現市街地・データ作成範囲全域)



図4 Case2の計算結果の一例  
(裸木造を全て防火構造の変更・データ作成範囲全域)



(2) 消防活動を想定して焼損の激しい範囲のみを対象とした計算

消防活動を想定して行った焼損の激しい範囲のみを対象とした計算においても(1)と同様に100回の計算を行った(図7~図10)。全般的な結果の傾向も(1)と同様であるが、特に火災初期の段階において消防活動の影響により延焼範囲は比較的狭い範囲に抑えられている。



図5 Case3の計算結果の一例  
(市街地②+飛び火係数1/40倍・データ作成範囲全域)

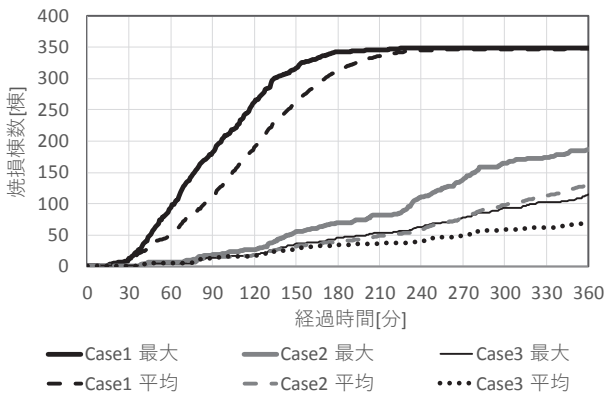


図6 100回計算を行った最大及び平均焼損棟数  
(データ作成範囲全域を対象とした計算)

図10には、図1に示した今回の火災で確認された実際の延焼動態から求めた焼損棟数の時刻歴を併せて示している。実際の火災に最も近い計算条件となるCase4と今回の火災を比較すると、Case4の平均値は、今回の火災をやや上回っているものの、焼損棟数の増加傾向は概ね同様の経過を示しており、シミュレーションによる計算の有効性を確認することができる。

(1)に示すCase1~Case3との比較では、Case4では1時間経過程度までは、焼損棟数の増加はCase1に比べて

緩慢であるが、東側や北側の街区に延焼が及ぶ頃に急激に加速し、平均で5時間程度で計算対象のデータ範囲の全域が焼損する結果となった。なお、Case4では100回の計算全てで飛び火が発生した。Case5及びCase6に関しては、火元建物のある街区では、北方向にのみ1時間あたり数棟ずつの緩慢な延焼性状を示しており、飛び火の影響を除けば火元建物のある街区北側の道路を越えずに計算が終了する結果となった。これにより、飛び火の発生がCase2やCase3に比べて大幅に抑制され、飛び火の発生はCase5では100回の計算中66回、Case6では100回の計算中1回のみであった。

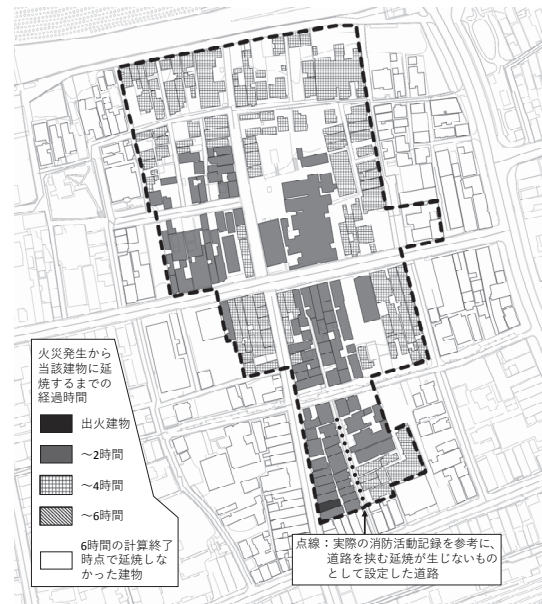


図7 Case4の計算結果の一例  
(再現市街地・消防活動を想定)

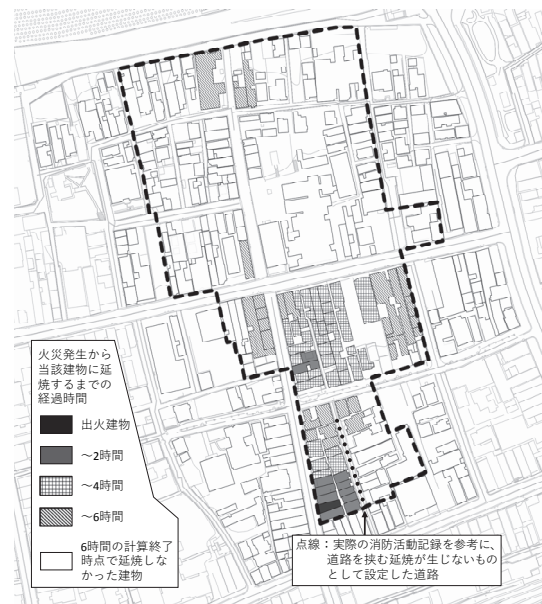


図8 Case5の計算結果の一例  
(裸木造を全て防火構造の変更・消防活動を想定)

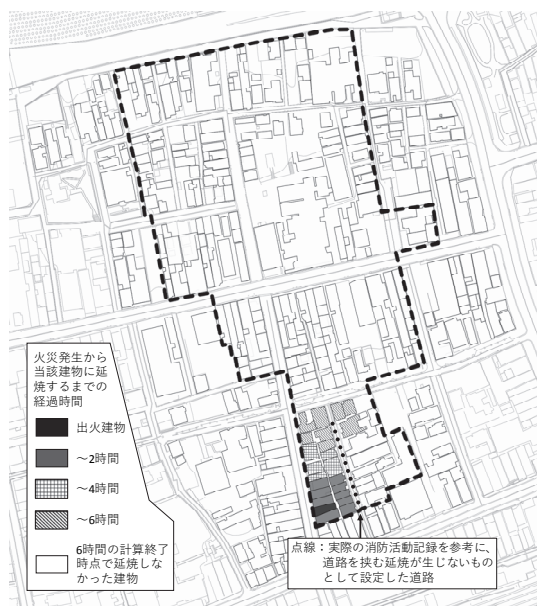


図9 Case6の計算結果の一例  
(市街地②+飛び火係数1/40倍・消防活動を想定)

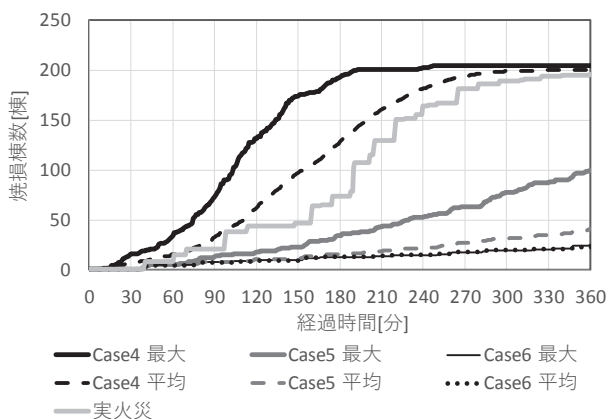


図10 100回計算を行った最大及び平均焼損棟数  
(消防活動を想定した計算)

## 6. まとめ

データ作成範囲全域を対象とした計算と消防活動を想定して焼損の激しい範囲のみを対象とした計算を行ったが、これら2種の計算範囲の計算に共通して次の傾向が確認された。

市街地①：再現市街地では、実際の火災と同様に多数の飛び火が発生し、市街地北端まで3時間程度で延焼。計算範囲内のほとんどの建築物が焼失。

市街地②：裸木造の外壁や開口部全てに防火措置を施した防火構造とした場合には、延焼速度が遅くなり、飛び火の発生数及び焼損棟数が大きく減少。

市街地③：市街地②に対して現代仕様の瓦屋根を想定して飛び火係数を1/40倍に低減した場合の計算を実施。飛

び火がほとんど発生しなくなり、焼損棟数がさらに減少。

裸木造を主体とする市街地では、出火後早期に隣棟への延焼拡大が生じ、飛び火が発生する可能性も高くなる。計算では、実際の火災と同程度あるいはさらに早く市街地北端の海岸沿いの建築物にまで延焼が拡大する状況が確認された。一方で裸木造建築物の外壁や開口部の全てに防火措置を施した防火構造建築物とした場合には、急激に延焼速度が遅くなり、出火後2時間程度までは、飛び火が生じにくい状況が確認できる。ただし、時間経過と共に燃焼範囲が拡大し、4~5時間後には飛び火の影響により焼損棟数の増加が徐々に早くなっている。さらに、屋根の仕様を現代仕様に変更した場合を想定して、飛び火係数が1/40倍に低減すると設定すれば、飛び火はほとんど発生せず、焼損棟数の極端な増加も見られなくなることが確認された。

なお、今回のシミュレーションによる検討は糸魚川市を対象として、特定の条件に基づいて行ったものであり、既存の市街地における延焼可能性を評価する際には、様々な気象条件や市街地特性などの条件を設定する必要がある。

**謝辞：** 今回の火災で被災された方々に心からお見舞いを申し上げますとともに、被災地の一刻も早い復興を祈念いたします。また、本調査を実施するにあたり、被災直後の混乱した状況下、あるいは復興・生活再建に向けて大変お忙しい中、被災建築物の調査に御協力いただいた方々、関係資料を御提供いただいた方々に対し、ここに深謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人建築研究所「平成28年（2016年）12月22日に発生した新潟県糸魚川市における大規模火災に係る建物被害調査報告書」，<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/184/all.pdf>，2017.7（2017年10月3日閲覧）
- 2) 糸魚川市大規模火災を踏まえた今後の消防のあり方に関する検討会「糸魚川市大規模火災を踏まえた今後の消防のあり方に関する検討会報告書」，[http://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi\\_kento/h29/itoigawa\\_daikibokasai/06/houkokusyo.pdf](http://www.fdma.go.jp/neuter/about/shingi_kento/h29/itoigawa_daikibokasai/06/houkokusyo.pdf)（2017年10月3日閲覧）
- 3) 国土地理院技術資料C・1-No.400「高度な画像処理による減災を目指した国土の監視技術の開発総合報告書」，<http://www.nilim.go.jp/lab/jdg/doc/gensai.pdf>（2017年10月3日閲覧）
- 4) 岩見達也，林吉彦，大宮喜文「飛び火を反映した市街地火災シミュレーションの構築（その2）火災実験に基づいた飛び火現象のモデル化とシミュレーションの構築」，日本建築学会2011年度大会（関東）学術講演梗概集A-2，2011.7

# 糸魚川火災における瓦屋根の飛び火に関する研究

水上 点睛<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国土技術政策総合研究所 建築研究部 防火基準室 (〒305-0802 茨城県つくば市立原1番地)

平成28年12月22日に発生した新潟県糸魚川市における大規模火災では、焼失棟数147棟、焼失区域面積約4万㎡に及ぶ被害がもたらされた。国土交通省住宅局の派遣要請を受けて、現地建物の被害調査を行った結果、飛び火による延焼の可能性が高い建物が多数確認された。中には不燃材料である瓦葺き屋根さえも飛び火による延焼が見られたことから、本研究では当地に存在した建物の建設当時の瓦屋根の仕様調査に基づいた模型試験体による火災風洞実験を行い、その発生メカニズムの解明を行った。

キーワード 糸魚川火災, 瓦屋根, 飛び火, 火災風洞実験

## 1. 糸魚川火災の概要

平成28年12月22日10時20分頃に発生した新潟県糸魚川市における大規模火災では、焼失棟数147棟、出火点から南へと延焼が拡大し、焼損区域面積約3万㎡に及ぶ被害がもたらされた。最寄りのアメダス観測所(糸魚川)によれば(図1)、火災当日は平均風速10m/s前後、最大瞬間風速で24.2m/sの非常に強い南風が吹いており、この南風に煽られて延焼が拡大したとみられる。

さらに特徴的なのは、延焼動態の推定を進めていく上で、出火点からの地理的に連続した延焼だけではなく、火の粉の飛散による飛び地への延焼が多数みられたことである。こうした火の粉の飛散による延焼の危険性は、炎上建物からの接炎や放射熱によるものに比べ小さく思われるが、その影響範囲が広範に及ぶこと、また一旦飛び火による延焼が生じると消防力が分散されてしまう等の恐れがある。

今回の火災では多くの報道機関等がヘリコプター

から火災現場の空撮を行い、また近年、スマートフォンなどのカメラ付きデバイスの普及を背景に、多くの市民により火災時の映像や画像が記録された。これらの映像や画像、証言を収集・分析した結果、飛び火による延焼の発生件数は、消防本部により確認されている10地点に、新たに確認された5地点を加え、合計15点であった(図2、表1、写真1)。

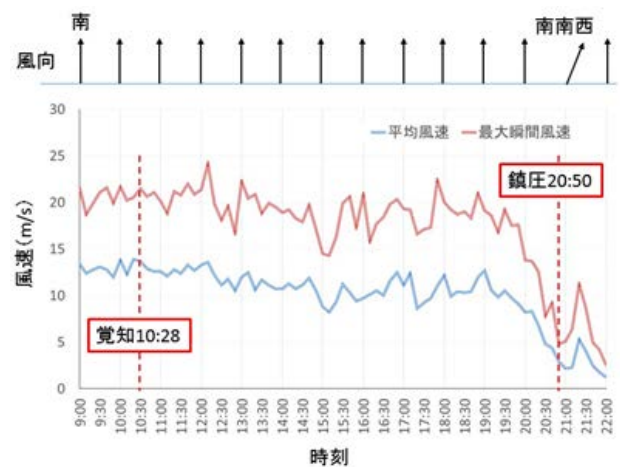


図-1 火災当日の風速と風向



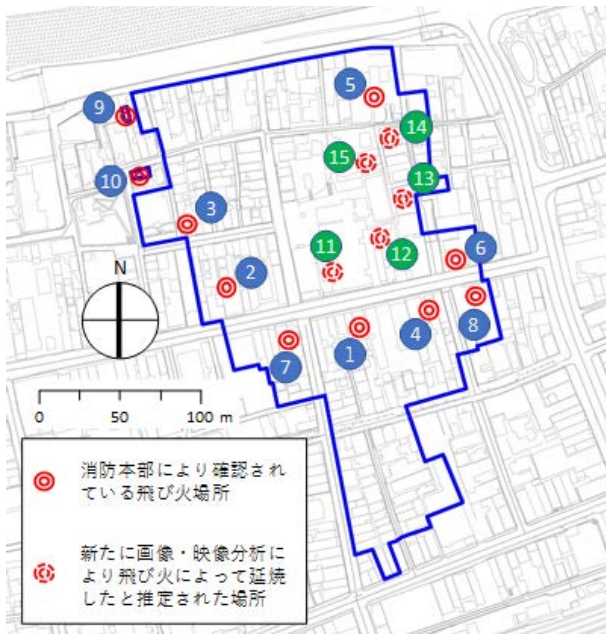


図-2 飛び火による延焼があったと推定された場所

表-1 飛び火による延焼推定時刻と建物状況

番号	飛び火確認時刻 (確認方法)	建物の状況	屋根の様
①	11:21 (消防)	木造2階建て	昭和初期仕様瓦葺
②	11:58 (消防)	木造2階建て	昭和初期仕様瓦葺
③	12:14 (消防)	木造2階建て	瓦葺(仕様不明)
④	12:48 (映像)	木造2階建て	昭和初期仕様瓦葺
⑤	13:00 (消防)	木造2階建て	昭和初期仕様瓦葺
⑥	13:26 (映像)	木造2階建て	不明
⑦*	13:45 (消防)	木造2階建て	昭和初期仕様瓦葺
		木造2階建て	瓦葺(仕様不明)
⑧	14:07 (映像)	木造2階建て	昭和初期仕様瓦葺
⑨	14:24 (映像)	木造2階建て	セメント瓦葺
⑩	15:33 (映像)	木造2階建て	瓦葺(仕様不明)
⑪	13:07 (映像)	木造2階建て	昭和初期仕様瓦葺
⑫	13:08 (映像)	不明	不明
⑬	13:31 (映像)	木造2階建て	昭和初期仕様瓦葺
⑭	13:31 (映像)	木造2階建て	瓦葺(仕様不明)
⑮	13:44 (映像)	木造2階建て	昭和初期仕様瓦葺

⑦に関しては最初に発煙を確認した時点で2棟の建物から発煙があり、いずれの建物において飛び火出火があったかを特定できず、2棟の情報を併記している。



写真-1 飛び火⑥発生時の状況

## 2. 瓦屋根仕様調査

糸魚川市では昭和7年に、今回の焼損区域を含む広範な地区が焼ける大火を経験していることもあり、昭和35年に準防火地域を指定している。この防火規制地区では屋根を例に挙げると、瓦や金属板などの不燃材料で葺くか造ることが要求される。加えて日本海に面する糸魚川地域では、塩害による腐蝕を考慮するため瓦屋根が多く見受けられた。

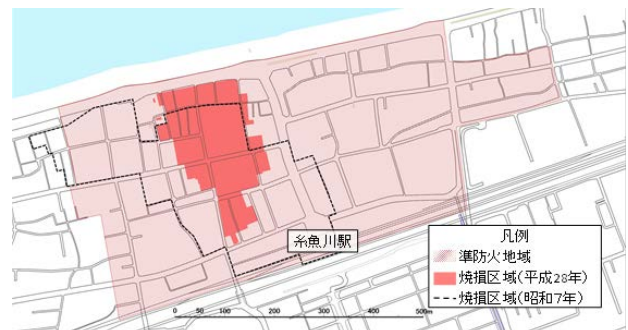


図-3 糸魚川市における準防火地域指定状況と焼損区域(昭和7年,平成28年)

しかしながら、写真2および表1に示すように、不燃材料である瓦葺き屋根であっても飛び火による延焼が見られたことから、本研究ではその発生メカニズムを解明するため、当地に存在した建物の建設当時の瓦屋根の仕様調査を行い、模型試験体を作成した上で、火災風洞実験を行うこととした。



写真-2 瓦屋根の飛び火による延焼事例

糸魚川市における昭和初期に建設された建物の瓦屋根の標準仕様について現地調査およびヒアリングを行い、得られた知見は以下の通りである。

- ・写真3に示すように、焼損区域外に残る建物の現地調査では、現代仕様と比較して昭和初期仕様の瓦屋根では、瓦のねじれや寸法の不揃いに伴って指1本が入るほどの隙間が多数見られた。

- ・瓦自体は、昭和30年代まではそれぞれの地場で焼く瓦が主流であり、昭和40年代から狂いの少ない三州瓦や陶器瓦が全国に流通した。地場産の瓦として、新潟県では安田瓦や陣ヶ峰瓦が有名だが、糸魚川地域では主に佐渡や石川と同じ49判の能登瓦が用いられていた。また、これら地場産の瓦も製造業者毎に個別の変遷を経ており、大まかには昭和45年以降、工業化が進む過程で寸法精度が向上したといえるが、昭和初期の段階では、依然としてねじれや反りの大きな瓦が用いられていた。

- ・瓦のねじれは、塩害や凍害の防止および積雪荷重

に耐えるための曲げ破壊強度の向上を狙った焼成温度の高さも一因であるが、現在のガス窯に対し古くは達磨窯であったために、均一で一定の焼成温度を保つことが難しかったことが第一の要因である。土の練り込みについても手練りから真空土練機の採用に移行しており、土粒子の粗密性および空隙率の改善が寸法誤差の低減につながっている。

- ・その結果、粘土瓦は昭和29年に工業製品として、日本工業規格（JIS）が定められ、ねじりや反りによる寸法誤差が±2mm以下に規定・管理されるようになってきている。加えて、平成13年には瓦屋根標準設計・施工ガイドラインも示され、施工管理も進んでいる。

- ・留め付け方法については、昭和初期仕様では瓦尻を瓦棧に載せず、銅線で吊る方法が用いられている。この方法の場合、長い年月を経ると潮風により腐食が進んで瓦がずれる恐れがある。これに対し現代仕様では、瓦棧に引掛けて釘留め、全数留め付けをする方法が推奨されている。

- ・留め付けの自由度が高い銅線で吊る方法では、地震時の瓦相互の接触被害に対しては有効とされるものの、過去の風被害によって瓦の重なりになずれが生じていた可能性も高い。瓦自身の耐久性は高いといえるが、地震・台風などの災害時及び定期的なメンテナンスが推奨される。

- ・棟の葺き土については、糸魚川地域ではモルタルを使った事例も報告されているが、塩害による溶融・流出の恐れがある。昭和50年頃から南蛮漆喰が利用されるようになっており、現代仕様では、繰り返し練りの効く葺き土と併用して、耐久性の高い棟葺き土が構築されている。

- ・下地については、昭和20年以前の糸魚川地域では、手割り板を屋根葺き材とした木羽屋根が多かったため、そのまま上から瓦を張った屋根が多く、昭和20年以降、新たに屋根をかける場合は、屋根下地として目透かし張りした広小舞に杉皮や巻木羽（約3mm

程度)を張り、腐らないようコールタールを塗布することが流行ったようである。現代仕様では、目透かしなく張りつめられた野地板あるいは構造用合板の上に、アスファルトルーフィングなどの防水層で下地が構成されており、例えば火の粉が瓦の隙間より侵入したとしても、即座に着火・延焼しにくい構造となっている。



写真-3 昭和初期仕様(左) 現代仕様(右)

現地調査・ヒアリングを元に作成した、糸魚川市における昭和初期の瓦屋根仕様を再現した試験体を図-4に示す。また、近年の新築木造建物の瓦屋根の標準仕様についても調査を行っており、これを元に作成した試験体を図-5に示すともに、両者の間の主な違いを表-2に示す(仕様が複数ある場合の再現試験体仕様については括弧【 】で表示する)。

表-2 瓦屋根の現地調査と現代仕様の比較

	昭和初期仕様 糸魚川	現代仕様 屋根標準施工
野地板	巾3寸厚12mm目透し	構造用合板・【野地板】
防水層	【巻木羽 杉3mm】・杉皮	アスファルトルーフィング・【高分子系下葺材】
瓦	地場産(古い能登瓦) 49判(49枚/坪)	工業製品化 53A JIS規格判(53枚/坪)
留付け	銅線縛り(瓦尻は瓦棧に不載)	引掛け瓦棧、釘留め
棟葺土	【葺き土】・モルタル	南蛮漆喰

### 3. 火災風洞実験

表2および図-4、5に示す昭和初期仕様及び現代仕様の2種類の試験体に対して、風上より火の粉を吹き付け、屋根下地への火の粉の着床及び燃え抜け状況について観察した。火の粉は、屋根試験体より風上に水平距離で3m、垂直距離で1.5mに設置した約0.5×0.5×0.5mの木製クリブ2個に着火し、炎が木製クリブ全体を包み込んだのを確認した後に、風速5m/sおよび10m/sの風を吹かせて発生させた(図6)。

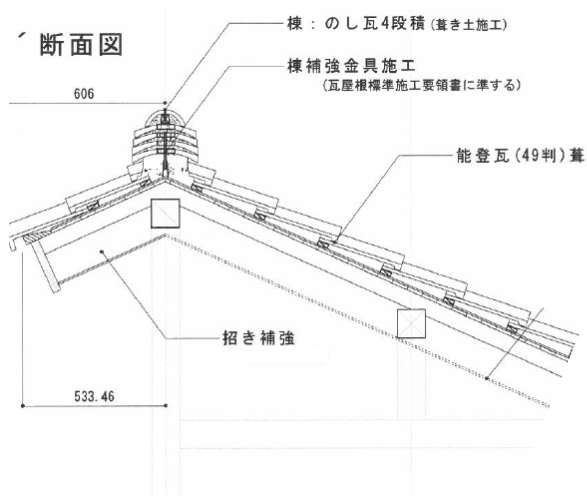


図-4 試験体断面図 昭和初期仕様

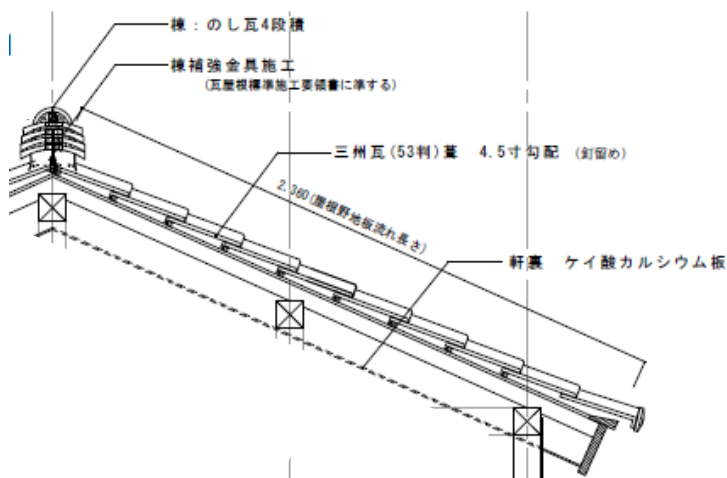


図-5 試験体断面図 現代仕様



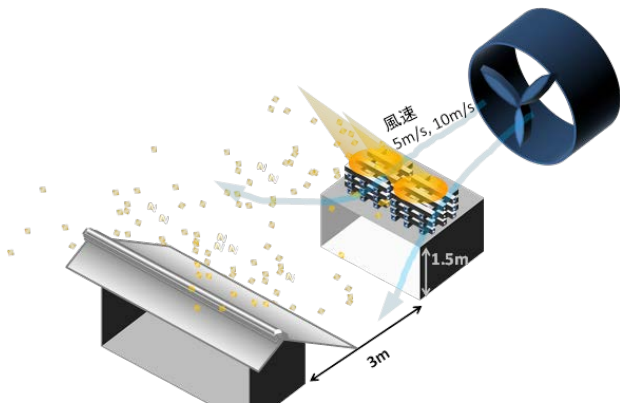


図-6 有風下での火の粉による出火実験概要

(1) 昭和初期仕様の実験結果

昭和初期仕様の試験体を用いた実験では、風速 5m/s では屋内側への燃え抜けは確認されなかった一方で、風速 10m/s では瓦屋根上部より白い煙が上がった後（写真 4）、屋内側に火炎の燃え抜けが確認された（写真 5）。消火後に瓦を除去して屋根下地を観察した結果、32 箇所で屋内側への燃え抜けが確認され（写真 6）、瓦の隙間を通じて侵入した火の粉が、屋根下地である巻木端あるいは瓦棧に着床して燃焼が継続し、やがて屋内側へと燃え抜けることが確認された。火の粉の侵入箇所は風向きに平行な瓦尻からのものが多いと見られ、瓦の緊結用に水平に配された瓦棧付近で大きく燃え抜けた箇所が多い（写真 7）ことから、瓦下に侵入後、瓦棧付近に火の粉が堆積し、薄く乾いて燃えやすい巻木端が燃え抜けることで、屋内に延焼したと考えられる。



写真-4 風速 10m/s 実験時の瓦屋根上部



写真-5 実験中の屋内側の状況



写真-6 棟部で屋根下地（巻木端）が燃え抜けた例



写真-7 瓦棧付近で燃え抜けた例



写真-8 瓦上部で消炎・堆積した火の粉（現代仕様）

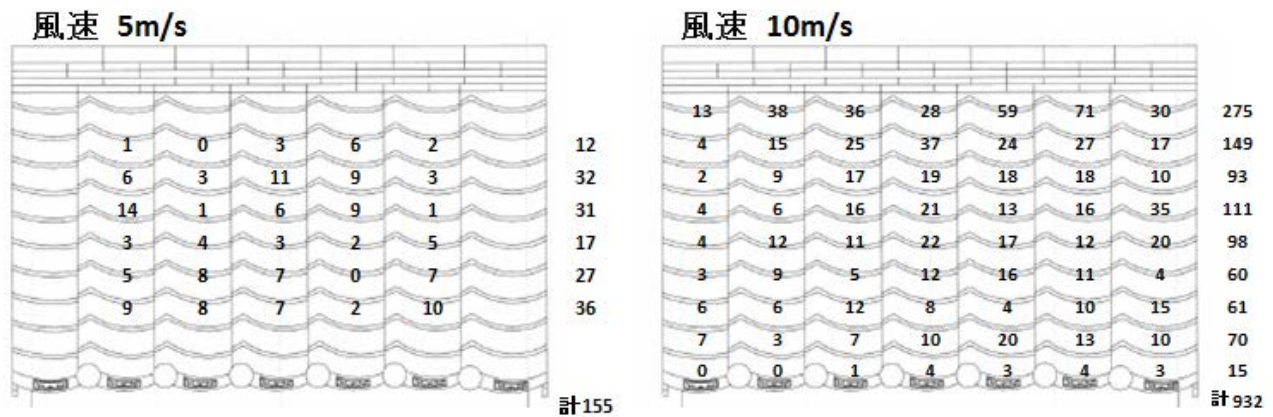


図-6 昭和初期仕様における火の粉の着床による焦痕の数

屋根下地に付いた火の粉の着床によるとみられる焦痕の数を数えた。実験は屋内側への延焼が確認された時点（写真6）で、消火、解体を行っており、また焦痕面積は考慮せず、写真7のように焦げ広がった部分の焦痕数は1とした。図7に焦痕の分布と数を記す。風速が上がるにつれて焦痕の数が増加することが分かる。また軒先から棟までの段数ごとに集計した数を比較すると、風速5m/sでは全体に均等に散らばっているのに対し、風速10m/sでは棟に近い側で焦痕が増加していることが分かる。これは棟付近での燃え抜けが多くみられた現地調査結果と符合する。今回の実験では瓦の隙間は軒と棟で大きな差はなく、また瓦下部には瓦を銅線で吊るための瓦棧が水平方向に通っており瓦下侵入後に火の粉が棟部に吹き寄せられたとは考えにくいため、瓦上部において棟の立ち上がりの影響で棟付近の方が火の粉が吹き溜まりやすく、結果として瓦下部に侵入する火の粉も多くなったと考えられる。

## (2) 現代仕様の実験結果

現代仕様の試験体を用いた実験では、風速5m/s、10m/sのいずれにおいても屋内側への燃え抜けは確

認されなかった。屋根下地における焦痕箇所を観察したところ、風速5m/sでは焦痕は確認されず、10m/sでは僅かに11か所のみと、昭和初期仕様に比べて約1/80と大幅に低減されることが確認された。侵入箇所は、瓦尻の差込部周囲に限定されており、当該部分は瓦棧で引掛ける構造上、数ミリ程度の隙間は避けられない。しかし瓦の重なりにより覆われる上、鍵状になっていることから、実際には瓦尻の段違い部分に堆積した火の粉が侵入するには、かなり焼け細るまで瓦上に留まると考えられ、実際に実験後には数多くの火の粉が瓦上で消炎した状態で堆積しているのが確認された（写真11）。内部の屋根下地で確認された焦痕も最大で5mm程度に留まっており、現代仕様であれば、屋根下地が燃え抜けることはないことが確認された。

謝辞： 本研究で、全日本瓦工事業連盟より瓦全般について、桜井瓦工業の桜井茂幸氏より瓦製造の工業化の流れについて、五泉市長の伊藤勝美氏より新潟県の瓦工業の変遷について、ハシバ建築の橋場義彦氏、金子瓦店の金子勇氏より、糸魚川地域の現代ならびに昭和初期における瓦仕様についてご教授賜りましたこと深くお礼申し上げます。

# 2016年熊本地震により被災した庁舎の被害要因 および地震後継続使用性の考察

渡邊 秀和<sup>1</sup>・向井 智久<sup>1</sup>・迫田 丈志<sup>2</sup>  
村松 大輔<sup>3</sup>・金子 治<sup>4</sup>・成田 修英<sup>4</sup>

<sup>1</sup>国立研究開発法人 建築研究所 (〒305-0802 茨城県つくば市 立原1番地)

<sup>2</sup>株式会社 堀江建築工学研究所 (〒151-0071 東京都渋谷区本町1-52-2 Kビル 4F)

<sup>3</sup>株式会社 HIテック (〒422-8076 静岡県駿河区八幡5丁目26-5-201)

<sup>4</sup>戸田建設株式会社 技術開発センター (〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1)

2016年に発生した熊本地震では、複数の庁舎において地震後継続使用できなくなった例が報告されている。本研究では、被災した庁舎を対象に大地震によってどのように建築物が損傷を受け、どのような損傷によって庁舎の継続使用が出来なくなったかについての検討を行った。その結果今回の検討においては、建築物の杭基礎部の損傷が原因となり、庁舎の地震後継続使用性が確保できなかったという結果が得られた。

キーワード 2016年熊本地震, 地震被害調査, 杭基礎構造, 庁舎の継続使用

## 1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災では、構造設計時に十分な検討が明示的に求められていない部位の損傷が顕在化し、その結果、当該建築物が地震後継続使用できなくなる事例が確認されており、現行基準の要求レベルを確保するだけでは、地震後の建築物の継続使用性は必ずしも確保されないことも明らかとなった<sup>1)</sup>。そこで建築研究所では、2013年度より、地震後の継続使用が強く求められる庁舎および避難施設の建築物を対象に、地震後継続使用性を確保するための要求性能の提案や、地震後継続使用性を判断する部位の損傷評価技術の開発を行ってきた<sup>2)</sup>。2016年に発生した熊本地震では、地震によって多くの建築物が大小様々な被害を受けた。また、複数の庁舎において地震後継続使用できなくなった例が報告されている<sup>3)</sup>。そこで本研究では被災した庁舎を対象に、地震によってどのように建築物が損傷を受け、どのような損傷によって庁舎の継続使用が出来なくなったかについての検討を行う。

6強：2回、震度6弱：3回、震度5強：5回、震度5弱：12回) 発生した。特に、4月14日21時26分に発生した前震(以下、前震)および4月16日01時25分に発生した本震(以下、本震)では、益城町宮園にある熊本県の震度情報ネットワークの震度計によって最大震度7が観測された。図-1に本震による震度分布を示す。

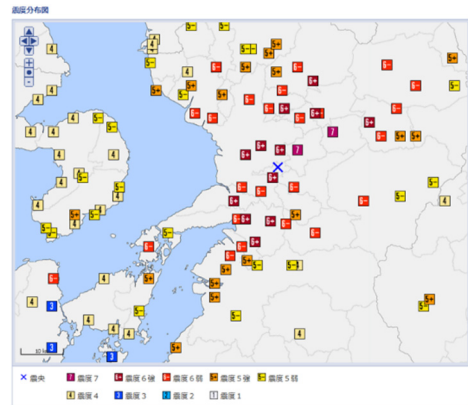


図-1 2016年熊本地震・本震(4月16日01時25分)の震度分布(気象庁 震度情報データベース<sup>5)</sup>より)

## 2. 熊本地震概要

2016年熊本地震とは、4月14日21時26分以降に発生した熊本県を中心とする一連の地震活動を指す<sup>4)</sup>。このうち、震度5弱以上の地震は24回(震度7：2回、震度

## 3. 対象建築物概要

対象とする建築物は、熊本県上益城郡益城町宮園にあり、1980年に建設された。本建築物は桁行方向9スパン、



張間方向4スパンのRC造の地上3階、塔屋1階の庁舎建築物で、平面形状は長方形である(図-2)。北側には隣接する建築物とを繋ぐ、渡り廊下棟(RC造2階)がエキスパンションジョイントを介して繋がっている。建築物の基礎は杭基礎であり、耐震補強時に作成された構造計算書には、φ400のPC杭またはAC杭(PHC杭)(長さ26~32m)、長期許容支持力500kN(50ton)との記載がある。杭本数は177本で、下屋や渡り廊下部分を除き1柱あたり3~6本ずつ配置されている。施工方法や杭頭接合部の詳細は不明である。また、南側のY0構面にプレキャスト外フレーム工法、X10通りとY4通りに鉄筋コンクリート造壁の増し打ち工法を用いた耐震補強を行っている。外付けフレームの基礎も杭基礎であり、回転杭工法による鋼管杭(軸径φ318.5mm、羽根径φ637mm、長さ27.0m)が柱1本あたり2本ずつ配置されている。地震時水平力の負担は不明である。本建築物は、前震の震央から北に5.6km、本震の震央から北東に6.7kmの距離に立地しており、両地震において震度7を記録した。また、地震時には北東側にエレベータ棟と鉄骨造の庇(写真-1)が存在したが、詳細調査実施時は撤去されていたため、今回は対象から除いて検討を行う。

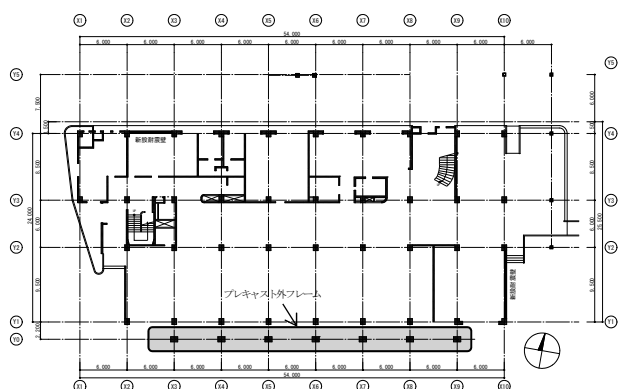


図-2 対象建築物平面図



写真-1 建築物北東のエレベータ棟と鉄骨造の庇

#### 4. 被害調査等に基づく被災度区分判定

2016年熊本地震の本震被災後に、上部構造および基礎構造の一部について被害調査を実施した。

##### (1) 上部構造の被害状況および被災度区分判定

既存の上部構造の被害は、建物内部・桁行方向(Y2通り)の両側柱付耐震壁に損傷度IIIが見られた以外は、写真-2のような損傷度IまたはIIの被害であった。また北側構面の非耐力壁と考えられる腰壁は柱との衝突により被害が確認できた(写真-3)。また、補強部であるプレキャスト外フレームの桁行方向の梁は、写真-4のように損傷度IIの被害が確認されたことから、プレキャスト外フレームが地震に対して抵抗したことがわかる。一方、プレキャスト外フレームと既存部を繋ぐ張間方向の境界梁は7本中6本が損傷度III、1本が損傷度Iとなった(写真-5)。境界梁せい面には北側上端から南側下端に向かう対角線斜めひび割れが発生していた。また、建築物南側の地盤変状も確認された(写真-6)。

本建築物は上部構造物の傾斜が観測された。なお、上部構造物の傾斜は直接計測できなかったため、各階柱の傾斜と床の傾斜の計測を行った。計測を行った柱および床面の傾斜の状況を図-3~4に示す。柱の計測は1800mmの高さから下げ振りを下ろし、その水平移動距離を計測し傾斜を求めた。図中には、柱の上部が傾いている方向を矢印で、傾きの数値を「\*\*/1800」として示している。床の計測は、傾斜計を用いて床の傾斜角度を計測した。図中には、床が下がっている方向を矢印で、傾きの数値を「\*\*°」として示している。また、表-1に、計測した範囲における各階の柱と床の傾斜角の最大値の一覧を示す。表-1および図-3~4を見ると、建築物は全体的に北側に向かって約1%傾いていることがわかった。このとき、補強部の傾きは既存部の傾きより小さくなる傾向があった。一方、桁行方向の傾きは計測箇所による計測値のばらつきがあり、建築物全体の傾斜は判断できなかった。



写真-2 損傷度Iの両側柱付壁



写真-3 腰壁の損傷



写真-4 損傷度IIの梁支配型柱



写真-5 外フレームと既存部の境界梁



写真-6 建築物南側の地盤変状

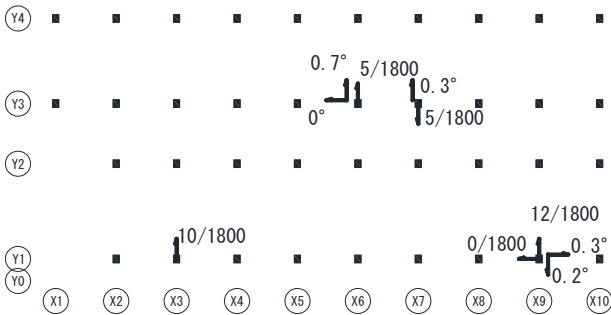


図-3 柱と床の傾斜計測結果 (3階)

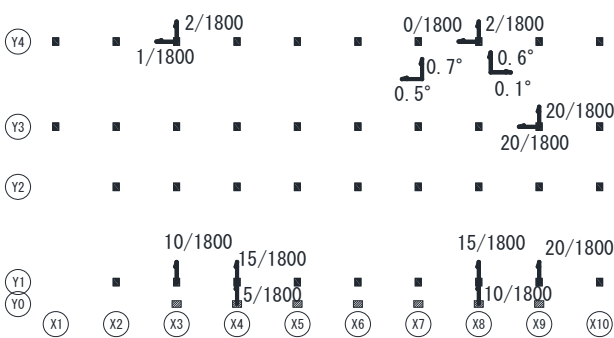


図-4 柱と床の傾斜計測結果 (2階)

表-1 柱と床の傾斜角の最大値

傾きの最大値	柱		床	
	南北	東西	南北	東西
3階(既存部)	0.67%	0.00%	1.22%	0.52%
2階(既存部)	1.11%	1.11%	1.05%	-0.87%
2階(補強部)	0.83%	-	-	-

エキスパンションジョイントで縁を切られている渡り廊下棟は1Fの柱の柱脚が圧壊し(写真-7), また2階のト形の柱梁接合部にも損傷が見られた。



写真-7 渡り廊下棟の1階柱の柱脚

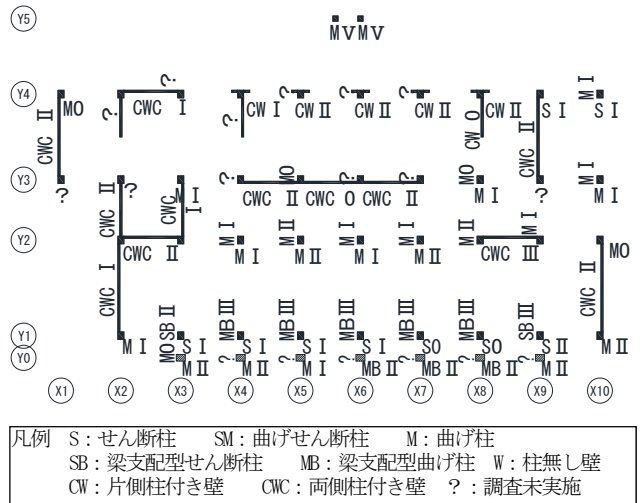


図-5 部材の損傷度判定結果 (1階)

最も被害が大きい1階について、被災度区分判定<sup>9)</sup>を実施した。部材の損傷度判定結果を図-5に示す。本建築物は、プレキャスト外フレーム工法および鉄筋コンクリート造壁の増し打ち工法を用いた耐震補強を行っている建物である。そこで、Y0構面のプレキャスト外フレームを無視した場合と、考慮した場合のそれぞれについて、被災度区分判定を実施した。本検討ではプレキャスト外フレームを鉄筋コンクリート造ラーメン架構と同様に扱うこととし、桁行・張間両方向とも強度指標1.0の曲げ柱として考慮した。また張間方向では増し打ちされた耐力壁については両方の被災度区分判定において考慮した。被災度区分判定を行った結果、耐震性能残存率Rが桁行方向で74.6、張間方向で73.8となり、建築物の被災度を中破とした。なお、判定の際にプレキャスト外フレーム



を考慮したところ、耐震性能残存率Rは桁行方向で74.9、張間方向で74.3であり、わずかに値が増加したが、被災度は変わらず中破のままであった。これは、既存部と補強部の部材の損傷度がほぼ同程度（IまたはII）だったことが原因である。渡り廊下棟は1Fにある2本の柱が共に損傷度Vのため、倒壊の判定となった。

## (2) 基礎構造の被害状況および被災度区分判定

図-6に建築物の相対沈下量を示す。この沈下量は、南側面、北側面、東側面の3側面の相対沈下量を示している。この相対沈下量とは、各側面の中で最も高い地点を0として、そこからの相対沈下量を表している。図-6を見ると、西側のX2通りの相対沈下量が北側で60mm、南側で98mmと大きな値を記録している。また、張間方向では、北側に向かって傾いており上部構造物の傾斜方向と一致した。また、これらの沈下量の大きい3ヶ所について基礎周辺を掘削し、杭頭部分の被害について調査が行われた。その時の杭頭部の状況を写真-8および写真-9に示す。No.1(X2-Y1)の杭は、杭頭部が大きく斜めに破壊され、また軸方向鉄筋の座屈とともに軸方向にも縮んでいる様子が観察された。No.2(X1-Y4)の杭は杭頭部が軸圧縮により破壊され軸方向鉄筋の座屈が見られた。なお、No.3の杭頭部の被害状況が詳細に分かる資料はないものの、ヒアリングによりNo.3の杭頭部に顕著な被害は見られなかったという報告を得ている。

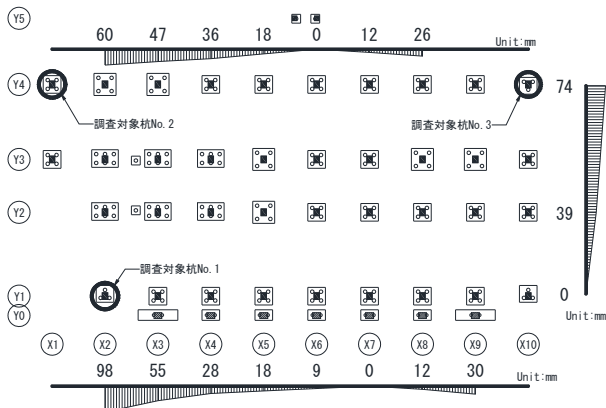


図-6 建築物の相対沈下量と調査した杭の位置

現行の被災度区分判定基準<sup>6)</sup>では、基礎構造の被害を推定するために基礎の傾斜と沈下量を用いた評価法が示されている。図-6で示したように、建築物の最大沈下量は98mm、桁行方向の最大傾斜角は南側面のX2-X3間の0.717% (=43mm/6000mm)、張間方向の最大傾斜角は東側面のY1-Y2間の0.411% (=39mm/9500mm)であった。これらの傾斜角を基礎の傾斜と読み替えると、前述の基準によると、基礎構造の被災度は中破となった。

また、建築研究資料<sup>7)</sup>に示されている既製杭の被災度区分判定に基づいて、杭頭部についても判定を行う。No.1の杭は斜めに破壊し、軸方向にも縮んでいることか

ら、軸力とせん断による被害と判断し、損傷度はVとした。また、No.2の杭は軸方向に破壊していることから、軸力による被害と判断し、損傷度はVとした。No.3の損傷度は不明である。

今回の調査の範囲において、直接杭頭部被害状況を見て被災度を判断できた杭はいずれも損傷度Vとなったため、基礎構造の被災度を大破と判断した。ただし、調査数が少ないため暫定的な判断であり、基礎構造の被災度を正確に判定するには今後さらなる調査が必要である。



写真-8 No.1(X2-Y1)の杭頭部の状況



写真-9 No.2(X1-Y4)の杭頭部の状況

## 5. 上部構造の被害要因分析

建築物の構造性能を把握し、被害要因を分析するために、補強された現況モデル(M1)、耐震補強前のモデル(M2)を作成し、立体弾塑性荷重増分解析を行った。

### (1) 立体弾塑性荷重増分解析

各部材断面等は、設計図書や耐震診断、改修計画報告書および現地被害調査の記載内容に基づき、剛床と杭位置を支点とした立体モデルとし、解析には一貫構造計算プログラム「BUS-6 Ver.1.0.8.5」を使用した。積載荷重には、設計における地震用積載荷重を考慮し、外力分布はAi分布に基づき、せん断破壊した部材耐力を保持したまま解析を行っている。ただし、層せん断力の集計ではせん断破壊した鉛直部材のせん断力を差し引き、層せん断力一層間変形角を算定している。

材料強度は、コンクリートは既存部 21N/mm<sup>2</sup>、耐震補強部のPCa部 50N/mm<sup>2</sup>、場所打ち部 24N/mm<sup>2</sup>とし、鉄筋は





壁のせん断破壊が生じていないことから、実際には本論で算定した保有水平耐力までは達していないものと考えられる。

## 6. 地震後の継続使用性に関する考察

本庁舎は、震災による建築物の構造被害および非構造部分や設備などの被害により、地震後に継続使用することができず、建て替えが決定した<sup>10)</sup>例である。表-3にヒアリングおよび資料<sup>10)</sup>によって得られた本庁舎に関する情報を時系列に従って列挙する。

前震後は役場内で窓口業務は行っていないが、災害対応業務は実施されていた。しかし、本震直後はすみやかに庁舎内を立入禁止し、災害対策本部を別の施設に再設置した。その後、庁舎内の危険な範囲（損壊したエレベータ棟、庇、渡り廊下）を撤去し、商用電源が確保できた約半月後に業務を復帰できている。また、9月末に杭基礎の調査結果と被災度区分判定結果によって構造躯体の被害が明らかとなっており、構造躯体の被害の把握には5ヶ月強の時間を要したことが分かる。以上のことから、上部構造物の損傷程度が中破程度で抑えられたことが地震後当面の継続使用性を確保できた要因と考えられる。一方で杭基礎が大破することで建築物の恒久復旧を困難としていると言える。

表-3 時系列に沿った出来事一覧

日付	出来事
2016	
4月14日	21時26分 前震発生（震度7） 庁舎が被災し停電したため、通電している近くの福祉センターに災害対策本部を設置した。ただし、庁舎の南側駐車場にも現地対策本部、を設置した。
4月15日	庁舎が復電し、本部を庁舎に集約。庁舎内で災害対応業務を行っていたが、窓口業務は行っていない。
4月16日	01時25分 本震発生（震度7） ・エレベータ棟、庇、渡り廊下の損壊 ・3階の電算室では機器のラックなど多数の什器が転倒や移動しており、サーバーが停止。 ・窓ガラスの落下 ・トイレの壁にひび割れ、タイルはく離。 ・塔屋に非常用電源が確保されていたが、作動せず、屋上のソーラーパネル自体は無損傷だが、そこからの配線が断線した可能性があり、電気の供給ができなかった。 ・給排水管および給水タンクの損傷 午後、福祉センターに災害対策本部を再設置した。前震後は本部を2カ所に分けていたが、本震後は被害が庁舎周辺だけでなく町内全域にわたっていたため、本部を福祉センターに一本化した。
	応急危険度判定実施、エレベータ棟、庇、渡り廊下の損壊により、「危険の判定」、エレベータ棟と庇の撤去が庁舎立入り可の条件とされた。
4月20日	庁舎のエレベータ棟と庇の撤去を開始し、4月末に完了。
5月2日	庁舎に復帰。この時点で復電済みだが、断水は継続し、仮設トイレを使用。災害対応のみの業務で庁舎を使用し、一般の来客は立入禁止。渡り廊下とエレベータの入り口には木板を打ち付けて閉鎖。
5月中旬	衛生設備と空調換気設備が復旧。（定期的に空調がなくても業務の支障はなかったとのこと）
6月6日	仮庁舎で業務開始
8月18日	杭基礎の調査 給水タンクはこのときも壊れたままのため、3階は断水
8月29日	被災度区分判定
9月末	調査結果報告
11月	新庁舎建設検討委員会の立ち上げ
12月20日	益城町復興計画 <sup>10)</sup> 策定、庁舎の建て替えが決定
2017	
5月	仮設庁舎に移転

## 7. まとめ

本研究では、2016年熊本地震で被災した庁舎の被害調査を行った。本研究で得られた成果を以下のように示す。

- ・対象建築物の上部構造について、耐震補強部を無視して被災度区分判定を実施した結果、中破の判定となった。一方、耐震補強部を考慮して判定を実施したとしても、同様に中破の判定結果となった。
- ・対象建築物の基礎構造について、被災度区分判定を実施した結果、大破の判定となった。
- ・建築物の構造性能を把握を目的として、対象建築物の解析を行った結果、耐震補強の効果が確認出来た。また、被災調査と比べると上部構造は本研究で仮定した保有水平耐力までは達していないと考えられる。
- ・対象建築物の地震後継続使用性に関する情報をまとめた。その結果、杭基礎が大破することで建築物の恒久復旧を困難としていたことが分かった。

最後に、本地震で亡くなられた方とそのご遺族に対し、深く哀悼の意を表するとともに、被災された方々に心からお見舞いを申し上げます。

謝辞：本研究の実施には、熊本県益城町役場総務課管財係様に情報提供して頂くとともに、地震被害調査にご協力頂きました。また、本研究は(国研)建築研究所指定課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性評価技術の開発」により実施しました。関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所，建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第674号，建築研究資料第136号，2012.3
- 2) 向井智久：東日本大震災での教訓を活かした耐震設計法に関する研究成果，建築研究所講演会資料，2015.3  
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h27/pdf/T3.pdf>)
- 3) 国交省：熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会報告書概要，2016.9  
([http://www.mlit.go.jp/report/press/house05\\_hh\\_000633.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000633.html))
- 4) 「平成28年（2016年）熊本地震」について（第41報）  
(<http://www.jma.go.jp/jma/press/1607/12a/kaisetsu201607121030.pdf>), 2016.7
- 5) 気象庁 震度情報データベース，2016.7閲覧  
(<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>)
- 6) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2016.3
- 7) 二木 幹夫, 上之菌 隆志, 中田 慎介：建築研究資料建築基礎の被災度区分判定指針及び復旧技術例，建築研究資料 No.90, 1997
- 8) 国土技術政策総合研究所，建築研究所監修：2015年版建築物の構造関係技術基準解説書，2015
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2010
- 10) 益城町復興計画，益城町役場 HP  
(<http://www.town.mashiki.lg.jp/>), 2016.12

# 堤防決壊時における排水対応マニュアルの作成

亀谷国大<sup>1</sup>・小池優<sup>1</sup>

<sup>1</sup>庄内川河川事務所 工務課（〒462-0052 名古屋市北区福德町5丁目52番）

庄内川流域は、海拔ゼロメートル地帯であり、人口や資産が集中していることから、堤防決壊時には応急復旧だけでなく、迅速な排水を行うことも重要である。そこで、災害時における一連の行動について、工務班、管理班といった班毎に整理し、排水活動に特化したマニュアルを作成した。

キーワード：災害対応、排水活動、堤防決壊シミュレーション

## 1. 庄内川流域について

庄内川は、愛知県北西部の太平洋側に位置し、岐阜県恵那市の夕立山を源流とし、中部地域の中心地である名古屋市を通過し伊勢湾に注ぐ、幹川流路延長96km、流域面積1,010km<sup>2</sup>の一級河川である。流域内に含まれる市町村は、19市4町であり、人口は246万人にのぼる。その人口の約90%が中下流域に集中している。また、流域の土地利用状況は、山林が45%、市街地等40%、農地等15%となっており、市街地化が進み、山林や水田の減少が見られる。



写真-1 H23台風15号による志段味地区越水箇所



図-1 庄内川水系図<sup>1)</sup>

流域内では度々浸水被害が発生しており、昭和34年の伊勢湾台風を始め、近年では平成元年、平成12年の東海豪雨、平成23年に、大きな被害が度々発生している。

## 2. 排水対応マニュアル策定の経緯

庄内川河川事務所では過年度より毎年堤防決壊シミュレーションにおいて、復旧工法の検討を実施しているところであるが、庄内川下流部は日本最大の海拔ゼロメートル地帯である濃尾平野が位置し、濃尾平野内の人口は約90万人であり、その中には中部地域の中心である名古屋市が含まれており資産も集中していることから災害ポテンシャルが高い。しかしながら、その地形特性により、水災害に対して極めて脆弱である。過去の伊勢湾台風（昭和34年）では各所で堤防が決壊し濃尾平野のほぼ全域において長期にわたる浸水被害が発生している。

このことから庄内川流域では浸水被害発生時には従前の堤防決壊シミュレーションより検討してきた堤防決壊



後の復旧工法の検討に加えて、迅速な排水活動が行えるよう排水も含めたシミュレーションに取り組む必要があった。

これを踏まえ庄内川河川事務所では、平成28年度より、従来の復旧工法の検討に加え、排水対応についても検討する演習を実施した。

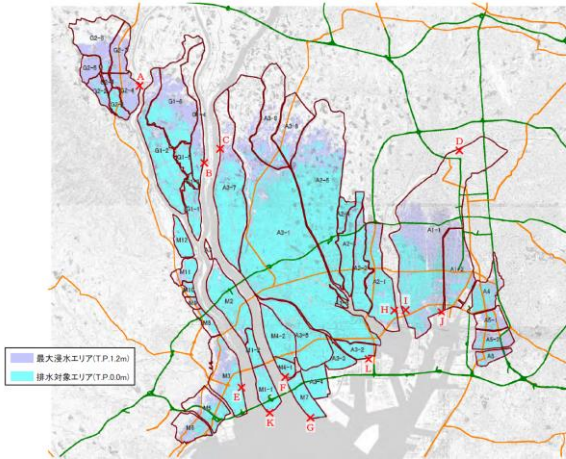


図-2 濃尾平野浸水区域図<sup>2)</sup>

排水対応の演習を実施した結果、以下の様な意見がでた。

- ・決壊してから排水ポンプ車の位置を決めては遅い
- ・ポンプ車の通行ルートの整理が必要
- ・直轄管理河川以外にも排水先を確保する必要がある
- ・参考例として、浸水想定をもとにした排水対応計画を事前に作成しておくことが必要

これらの意見を踏まえ、災害時に迅速かつ、的確な行動が取れるように排水対応マニュアルを作成することとした。



写真-2 H28堤防決壊シミュレーションの様子

### 3. 排水対応マニュアルについて

#### (1) マニュアルの作成に当たって

排水対応マニュアルを策定するに当たって以下の事項を念頭に置いて作成した。

- ・降雨発生から被害の収束までの事務所全体の動きが分かるようにタイムラインを整理する。
- ・排水対応計画を立てる際に必要となる、基礎的な情報を可能な限り盛り込む。

#### (2) マニュアルの構成

本マニュアルは大きくわけ以下の4つの要素から構成されている。

##### a) 対応行動フロー

一枚の表に降雨開始から被害収束までの各班の対応行動を時系列にまとめた資料

##### b) 対応行動

各班の具体的な行動内容をまとめた資料

##### c) 対応行動チェックリスト

対応行動に記載している行動に漏れが無いチェックするための資料

##### d) 事前準備資料

各対応行動を実施する際に必要となる情報をまとめた資料

#### (3) 対応行動フロー

対応行動フローは、降雨開始から排水完了までの間の各段階でそれぞれの班が取るべき行動を、図-3に示すように、一枚の表に時系列に沿って整理した。

なお、これらの行動は、災害対策本部運営要領との整合を図りながら作成している。

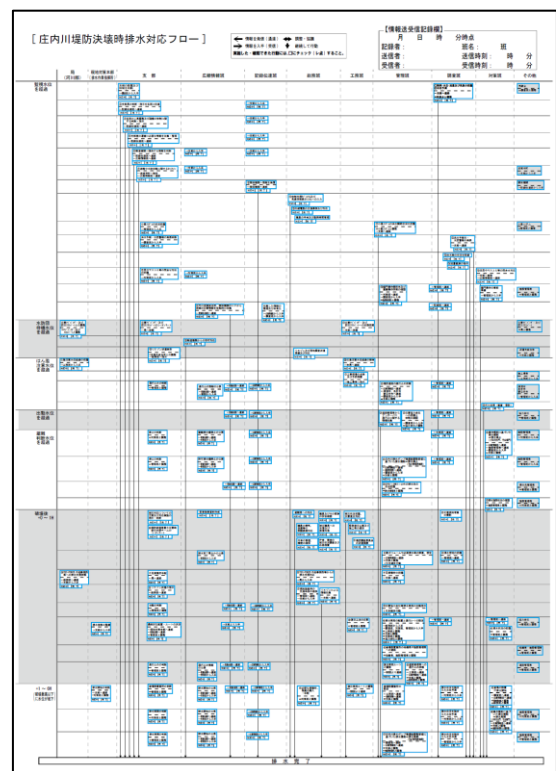


図-3 対応行動フロー図

また、図-4に示すように対応行動ごとに「対応中」、「完了」のチェック欄を設けている。

この対応行動フローは、災害時にA0版などに出力し、各対応行動の「対応中」、「完了」にチェックすることで、各班が各段階で他班が実施している対応行動を把握できるとともに、お互いの対応行動を確認することで必要な対応行動が抜けていないか確認しながら作業を進められるよう工夫をしている。

また、情報の入手先や、情報の提供先を記入しておくことで、効率的に行えるようにした。

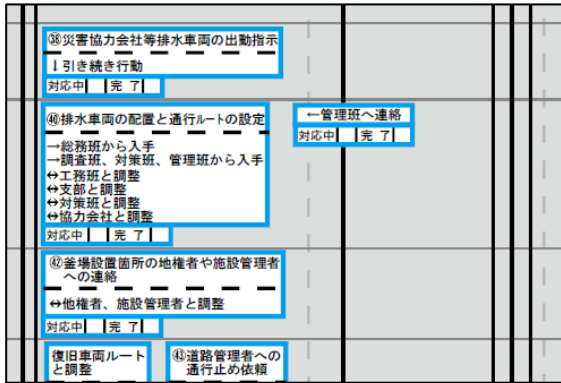


図-4 対応行動フロー拡大図

(4) 対応行動

対応行動フローで示している対応行動毎に、以下の項目を整理している。

- ・ 行動内容
- ・ 行動目的
- ・ 担当班
- ・ 事前資料(発災前の通常時に収集・整理しておくべき資料)
- ・ 対応事項(本行動で判断・検討すべき事項)
- ・ 詳細行動フロー(対象行動の情報伝達フロー)

また、各対応行動での確かつ迅速な情報伝達出来るように統一した様式を作成した。(図-5)

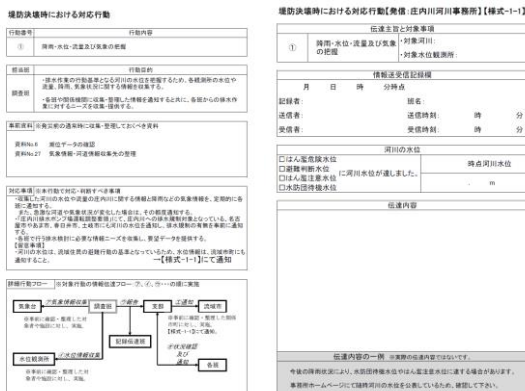


図-5 対応行動と報告様式

(5) 対応行動チェックリスト

災害時には、人員確保や情報伝達で慌ただしくなることが予想される。そのような状況下で必要な行動を漏れなく行う事は極めて困難な事である。そこで、各対応行動で必要な調整事項や確認事項、連絡事項を箇条書きで整理し、対応行動フローと同様に、対応中、対応済みのチェック欄を設け、漏れが無い分かるように工夫している。(図-6)

堤防決壊時における対応行動 チェックリスト

行動番号	行動内容	担当班
①	降雨・水位・流量及び気象の把握	調査班

行動内容の確認	※主な必須行動を記載しているが、河道や浸水状況等に対応し「行動目的」を達成するために必要な行動を追記し、確認すること。	対応中	完了
ア 気象情報収集	・ 庄内川流域及びその周辺の気象観測所とその連絡先を確認したか。 ・ 降雨予測について、定期的に確認しているか。		
イ 水位情報収集	・ 水位観測所の位置と監視状況を確認したか。 ・ 降雨予測を用いた水位予測プログラムを確認したか。 ・ 定期的に河川の水位予測を行っているか。		
ウ 報告	・ 気象や水位状況を定期的に報告しているか。 ・ 避難や埋没行動に関する水位に到達すると予測された場合、即時に報告しているか。		
エ 通知	・ 流域市に対し、水位情報を通知しているか。 ・ はん蓋注意水位に達することが予測された場合、即時に周知しているか。		
オ 状況確認及び通知	・ 緊急体制を整える必要性が高まった場合、各班に情報を通知したか。		

図-6 チェックリストの例

(6) 事前準備資料

事前準備資料では、各班が各対応行動を実施していく上で事前に把握しておく必要がある、ポンプ車の配置可能箇所や通行出来そうな道路のデータ、排水効果が期待出来そうな直轄管理河川以外の排水先やその協議先などの資料について洗い出しを行った。



図-7 排水ポンプ車配車調査箇所位置図



例として、排水ポンプ車の設置位置の候補については、流域内のポンプ車が設置出来そうな箇所(図-7)について現地調査を実施し、図-8に示すような箇所毎の調査表を作成し整理した。



図-8 排水ポンプ車配車代表箇所調査表

調査表には横断面図やアクセスルート、現地の状況写真、道路状況などを整理している。

また、調査表は効果が発揮出来る箇所だけでなく、効果が発揮できない箇所についても整理している。これは、災害時に追加で配置箇所の検討が必要になったときに、検討する箇所を減らす事を目的としている。

また、排水対象ブロック毎に必要な排水ポンプ車のおおよその台数と排水必要日数をまとめてあり、排水対象エリアがつかめれば現地に派遣すべきポンプ車の台数と排水完了までの日数を容易につかむことが出来るようにした。(図-9)

例として、図-11に示す下-2Rブロックが浸水した場合は、図-10より必要なポンプ台数84台、排水完了まで5日必要と把握することが出来る。

これにより、TEC-FORCEの派遣依頼といった初動対応の迅速化が期待できる。

調査対象	調査対象の概要	調査結果(1)				調査結果(2)				備考
		調査箇所	調査区画	調査内容	調査結果	調査箇所	調査区画	調査内容	調査結果	
庄内川	庄内川	1	1	1	1	1	1	1	1	
庄内川	庄内川	2	2	2	2	2	2	2	2	
庄内川	庄内川	3	3	3	3	3	3	3	3	
庄内川	庄内川	4	4	4	4	4	4	4	4	
庄内川	庄内川	5	5	5	5	5	5	5	5	
庄内川	庄内川	6	6	6	6	6	6	6	6	
庄内川	庄内川	7	7	7	7	7	7	7	7	
庄内川	庄内川	8	8	8	8	8	8	8	8	
庄内川	庄内川	9	9	9	9	9	9	9	9	
庄内川	庄内川	10	10	10	10	10	10	10	10	
庄内川	庄内川	11	11	11	11	11	11	11	11	
庄内川	庄内川	12	12	12	12	12	12	12	12	
庄内川	庄内川	13	13	13	13	13	13	13	13	
庄内川	庄内川	14	14	14	14	14	14	14	14	
庄内川	庄内川	15	15	15	15	15	15	15	15	
庄内川	庄内川	16	16	16	16	16	16	16	16	
庄内川	庄内川	17	17	17	17	17	17	17	17	
庄内川	庄内川	18	18	18	18	18	18	18	18	
庄内川	庄内川	19	19	19	19	19	19	19	19	
庄内川	庄内川	20	20	20	20	20	20	20	20	
庄内川	庄内川	21	21	21	21	21	21	21	21	
庄内川	庄内川	22	22	22	22	22	22	22	22	
庄内川	庄内川	23	23	23	23	23	23	23	23	
庄内川	庄内川	24	24	24	24	24	24	24	24	
庄内川	庄内川	25	25	25	25	25	25	25	25	
庄内川	庄内川	26	26	26	26	26	26	26	26	
庄内川	庄内川	27	27	27	27	27	27	27	27	
庄内川	庄内川	28	28	28	28	28	28	28	28	
庄内川	庄内川	29	29	29	29	29	29	29	29	
庄内川	庄内川	30	30	30	30	30	30	30	30	
庄内川	庄内川	31	31	31	31	31	31	31	31	
庄内川	庄内川	32	32	32	32	32	32	32	32	
庄内川	庄内川	33	33	33	33	33	33	33	33	
庄内川	庄内川	34	34	34	34	34	34	34	34	
庄内川	庄内川	35	35	35	35	35	35	35	35	
庄内川	庄内川	36	36	36	36	36	36	36	36	
庄内川	庄内川	37	37	37	37	37	37	37	37	
庄内川	庄内川	38	38	38	38	38	38	38	38	
庄内川	庄内川	39	39	39	39	39	39	39	39	
庄内川	庄内川	40	40	40	40	40	40	40	40	
庄内川	庄内川	41	41	41	41	41	41	41	41	
庄内川	庄内川	42	42	42	42	42	42	42	42	
庄内川	庄内川	43	43	43	43	43	43	43	43	
庄内川	庄内川	44	44	44	44	44	44	44	44	
庄内川	庄内川	45	45	45	45	45	45	45	45	
庄内川	庄内川	46	46	46	46	46	46	46	46	
庄内川	庄内川	47	47	47	47	47	47	47	47	
庄内川	庄内川	48	48	48	48	48	48	48	48	
庄内川	庄内川	49	49	49	49	49	49	49	49	
庄内川	庄内川	50	50	50	50	50	50	50	50	
庄内川	庄内川	51	51	51	51	51	51	51	51	
庄内川	庄内川	52	52	52	52	52	52	52	52	
庄内川	庄内川	53	53	53	53	53	53	53	53	
庄内川	庄内川	54	54	54	54	54	54	54	54	
庄内川	庄内川	55	55	55	55	55	55	55	55	
庄内川	庄内川	56	56	56	56	56	56	56	56	
庄内川	庄内川	57	57	57	57	57	57	57	57	
庄内川	庄内川	58	58	58	58	58	58	58	58	
庄内川	庄内川	59	59	59	59	59	59	59	59	
庄内川	庄内川	60	60	60	60	60	60	60	60	
庄内川	庄内川	61	61	61	61	61	61	61	61	
庄内川	庄内川	62	62	62	62	62	62	62	62	
庄内川	庄内川	63	63	63	63	63	63	63	63	
庄内川	庄内川	64	64	64	64	64	64	64	64	
庄内川	庄内川	65	65	65	65	65	65	65	65	
庄内川	庄内川	66	66	66	66	66	66	66	66	
庄内川	庄内川	67	67	67	67	67	67	67	67	
庄内川	庄内川	68	68	68	68	68	68	68	68	
庄内川	庄内川	69	69	69	69	69	69	69	69	
庄内川	庄内川	70	70	70	70	70	70	70	70	
庄内川	庄内川	71	71	71	71	71	71	71	71	
庄内川	庄内川	72	72	72	72	72	72	72	72	
庄内川	庄内川	73	73	73	73	73	73	73	73	
庄内川	庄内川	74	74	74	74	74	74	74	74	
庄内川	庄内川	75	75	75	75	75	75	75	75	
庄内川	庄内川	76	76	76	76	76	76	76	76	
庄内川	庄内川	77	77	77	77	77	77	77	77	
庄内川	庄内川	78	78	78	78	78	78	78	78	
庄内川	庄内川	79	79	79	79	79	79	79	79	
庄内川	庄内川	80	80	80	80	80	80	80	80	
庄内川	庄内川	81	81	81	81	81	81	81	81	
庄内川	庄内川	82	82	82	82	82	82	82	82	
庄内川	庄内川	83	83	83	83	83	83	83	83	
庄内川	庄内川	84	84	84	84	84	84	84	84	
庄内川	庄内川	85	85	85	85	85	85	85	85	
庄内川	庄内川	86	86	86	86	86	86	86	86	
庄内川	庄内川	87	87	87	87	87	87	87	87	
庄内川	庄内川	88	88	88	88	88	88	88	88	
庄内川	庄内川	89	89	89	89	89	89	89	89	
庄内川	庄内川	90	90	90	90	90	90	90	90	
庄内川	庄内川	91	91	91	91	91	91	91	91	
庄内川	庄内川	92	92	92	92	92	92	92	92	
庄内川	庄内川	93	93	93	93	93	93	93	93	
庄内川	庄内川	94	94	94	94	94	94	94	94	
庄内川	庄内川	95	95	95	95	95	95	95	95	
庄内川	庄内川	96	96	96	96	96	96	96	96	
庄内川	庄内川	97	97	97	97	97	97	97	97	
庄内川	庄内川	98	98	98	98	98	98	98	98	
庄内川	庄内川	99	99	99	99	99	99	99	99	
庄内川	庄内川	100	100	100	100	100	100	100	100	

図-9 排水ポンプ車配置調査結果一覧表

調査対象	調査対象の概要	調査結果(1)				調査結果(2)				備考
		調査箇所	調査区画	調査内容	調査結果	調査箇所	調査区画	調査内容	調査結果	
庄内川	庄内川	1	1	1	1	1	1	1	1	
庄内川	庄内川	2	2	2	2	2	2	2	2	
庄内川	庄内川	3	3	3	3	3	3	3	3	
庄内川	庄内川	4	4	4	4	4	4	4	4	
庄内川	庄内川	5	5	5	5	5	5	5	5	
庄内川	庄内川	6	6	6	6	6	6	6	6	
庄内川	庄内川	7	7	7	7	7	7	7	7	
庄内川	庄内川	8	8	8	8	8	8	8	8	
庄内川	庄内川	9	9	9	9	9	9	9	9	
庄内川	庄内川	10	10	10	10	10	10	10	10	
庄内川	庄内川	11	11	11	11	11	11	11	11	
庄内川	庄内川	12	12	12	12	12	12	12	12	
庄内川	庄内川	13	13	13	13	13	13	13	13	
庄内川	庄内川	14	14	14	14	14	14	14	14	
庄内川	庄内川	15	15	15	15	15	15	15	15	
庄内川	庄内川	16	16	16	16	16	16	16	16	
庄内川	庄内川	17	17	17	17	17	17	17	17	
庄内川	庄内川	18	18	18	18	18	18	18	18	
庄内川	庄内川	19	19	19	19	19	19	19	19	
庄内川	庄内川	20	20	20	20	20	20	20	20	
庄内川	庄内川	21	21	21	21	21	21	21	21	
庄内川	庄内川	22	22	22	22	22	22	22	22	
庄内川	庄内川	23	23							



# 平成28年台風10号空知川上流における 画像処理型流量観測の適用性 —大規模出水に対応した流量観測高度化（その2）—

佐々木 靖博<sup>1</sup>・佐藤 匡<sup>1</sup>・平垣 貴俊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北海道開発局 札幌開発建設部 河川管理課（〒060-8506 北海道札幌市中央区北2条西19丁目）

平成28（2016）年8月の台風10号による洪水は、空知川上流域において空知川の堤防2カ所が決壊する計画規模を超える出水となった。幾寅水位流量観測所の施設が被災し、水位自動計測および、現行法（浮子観測）による流量観測が不可能な事態が生じたため、画像解析による流量算定を試みた。本研究は、想定を超えた大規模出水時におけるカメラ画像処理法（STIV法）と力学的内外挿法（DIEX法）の適用性と、大規模出水時のピーク流量を流水抵抗の解析から求める手法を空知川での出水にて検討したものである。

キーワード 画像処理型流量観測、大規模出水、STIV法、DIEX法、流水抵抗

## 1. はじめに

札幌開発建設部では2015年より画像解析を用いた流量観測の適用性を検討している。札幌開発建設部が進めている画像処理型流量観測とは、河川の流れを撮影した画像からSTIV法（Space Time Image Velocimetry）<sup>1)</sup>を用いて表面流速を測定し、DIEX法（Dynamic Interpolation and Extrapolation）<sup>2)</sup>を用いて、表面流速を横断面上に内外挿して流量を算出するものである。

画像解析に使用するカメラは観測員が持ち込むポータブルな動画撮影カメラと観測所に設置されたCCTVがある。画像解析は水表面に波紋が明瞭なことが解析精度に関係するが、昨年度の検討結果<sup>3)</sup>によると、札幌開発建設部管内では63%の水位流量観測所で高水時の画像処理型流量観測が可能で、CCTVが設置されている札幌開発建設部管内の水位流量観測所では30%が高水時の画像処理型流量観測が可能とされている。

また、画像処理型流量観測は、非接触型であるため、川から離れて観測することができることや、川幅全体が画角に収まっていれば20秒程度の動画データで測定可能であることから、大規模出水時に要求される「安全」「迅速」「省力」「高精度」な観測手法として、適用能力が高いと評価している。

しかし、このような新技術を用いた手法は、実用に資する技術であることは実証されているものの、水文行政での適用事例はそれほど多くはない。特に大規模出水時においては観測そのものがまれないこともあり、有意な事例はあまり報告されていない。

本研究では、2016年8月に空知川上流で発生した計画規模を超える出水時において、現地での画像処理型流量

観測を行った事例を紹介し、現地観測における画像処理型流量観測の適用性を検討する。また、計画規模を超える出水において水位ピーク時の流量観測ができなかった場合の、ピーク流量の推定方法について、工藤ら<sup>4)</sup>が推奨する小規模河床波と流水抵抗を考慮した検討を行った。

## 2. 空知川上流での豪雨災害

### (1) 2016年8月の台風上陸と記録的豪雨

土木学会の「2016年8月北海道豪雨災害調査団緊急報告会」<sup>5)</sup>によると、2016年8月17日～23日の1週間には台風7号、11号、9号と立て続けに北海道を直撃した。これらは前線と台風による降雨をもたらした。さらに8月29日～31日には前線と4個目として太平洋側から接近した台風10号は台風接近前の東寄りの暖湿気が地形性降雨によって300mm程度となり、台風本体接近で更に200mmの大雨が加わったと推察される。これによって、日高山脈の標高の高い地域で集中的に500mmを超える大雨を記録している。

空知川上流の串内雨量観測所では515mm（速報値）の大規模な降雨となり、水位が下がりきる前に何波にもわたって降り続いた大雨の影響で土壌の湿潤状態がほぼ飽和状態になっていたと想定される。

降雨に対して流出が増加しやすい条件になっていたことから、空知川上流において既往最大の出水が発生したと推察される。

## (2) 空知川上流の現地状況

2016年8月30日～31日には、**図-1**に示す空知川本川の堤防が2か所決壊したため、南富良野町市街地が約130ha浸水する被害が発生した。以下に現地状況を時系列で示す。

### a) 8月30日17時頃

幾寅水位流量観測所の水位計が故障し、データが得られなくなった。そこでCCTVで水位標を読み取りながら監視を行った。

### b) 8月30日19時頃

幾寅水位流量観測所に観測員が到着し、浮子による高水流量観測を実施しようとしたが、第1見通し、第2見通しが消失した状況で観測が困難であった(**図-2**)。またアクセス道路の冠水や空知川水位の上昇により危険と判断し、作業中止と安全な場所(国道38号線方面)への避難を指示した。なお、この時点では上流の破堤箇所1(**図-1**)では破堤していなかった。その後、国道38号線の南富良野町方面が通行止めになり、夜間の観測は不可能になった。

### c) 8月30日21時30分頃

CCTVが停電のため通信できなくなり、現地情報が途絶えた。この時、水位は上昇を続けており、ピーク水位の観測はできなかった。

### d) 8月31日3時頃

太平橋上流の堤内側から堤外側へ堤防の越水を確認した。( **図-1**の破堤箇所2)

### e) 8月31日5時頃

朝を迎えて観測が可能となった5時頃には、空知川が2か所破堤しており、南富良野町が広範囲に冠水していた(**図-1**)。そのため、幾寅水位流量観測所へのアクセスが不可能となり、下流の太平橋で浮子での流量観測を開始した。ただし、太平橋は流量観測所ではないため、橋から上流方向に浮子を投下し、橋下を第1断面、橋下流のKp0.75を第2断面として観測を実施した。しかし、**図-3**のように流下した建造物等などが橋に衝突し、橋上は危険な状態が続いた。

そこで、左岸の現時点で安全な箇所に動画撮影カメラ(SONY  $\alpha$ 7S II)を設置し、画像処理型流量観測を並行して実施した。

### f) 8月31日6時頃

6時頃になると、**図-4**のように太平橋の橋台部が損壊しはじめ、橋上への立入禁止となったため、浮子による流量観測が不可能となった。これ以降、12時までには1時間毎に、動画撮影カメラによって約20秒間の撮影を行いデータ取得した。

なお、太平橋は水位観測所ではなく、水位標がないことから、**図-5**の水没したバックホーを定期的に撮影しておき、後日測量によって水位を算出した。



図-1 南富良野町周辺の浸水状況 (2016年8月31日6時頃)



図-2 幾寅水位流量観測所の現地状況 (8月30日19時頃)



図-3 太平橋観測状況：流下物 (8月31日5時頃)



図-4 太平橋観測状況：橋の損壊 (8月31日6時頃)



図-5 水位測定：バックホー (8月31日5時頃)



### 3. 画像処理型流量観測の適用

#### (1) STIV法（時空間輝度勾配法）による表面流速算出

取得した動画像からSTIV法（Space Time Image Velocimetry）を用いて表面流速を算出した。STIV法はまず、動画像を真上からの映像に幾何補正する。次に流下方向の検査線を設定して、縦軸が時間、横軸が長さの時空間画像を作成し、時空間画像の傾きから流速を算出する。幾何補正するためには標定点のXYZ座標が必要になるが、太平橋は緊急に観測所としたため、標定点は設定していない。そこで、**図-6**の赤丸点に示す看板や橋の手摺マークなど消失しないと考えられるものを急ぎよ標定点と設定し、これらを画面内に収めるように動画を撮影した。残存した標定は後日測量してXYZ座標を求めた。幾何補正した画像から**図-7**に示す検査線を流下方向に15本設定し、得られた時空間画像から流速を算出した。

#### (2) DIEX法（力学的内外挿法）による流量算出

流量の算出には力学的内外挿法（Dynamic Interpolation and Extrapolation method）を用いた。DIEX法は、観測した表面流速「点」データから「面」データを推定し流量を算出する方法で、式(1)に示す簡略化した3次元運動方程式を用いる。ここで、省略された項を補うために付加項 $F_a$ を導入している。

$$F_a + gI + A_H \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \left( \frac{C_f}{h} + \frac{aC_D}{2} \right) u^2 = 0 \quad (1)$$

ここで、 $y$ は横断方向、 $u$ は主流方向水深平均流速、 $A_H$ は水深平均された水平渦動粘性係数、 $h$ は水深、 $C_f$ は底面摩擦係数（ $= gn^2/h^{1/3}$ 、 $n$ ：マンギングの粗度係数）、 $I$ は水面勾配、 $g$ は重力加速度、 $a$ は植生密度パラメータ、 $C_D$ は植生の抵抗係数である。

これより8月31日5時～12時の太平橋全流量 $Q_T$ を算出した。DIEX法による流速内外挿と流量算出の一事例を**図-8**に示す。なお、8月31日5時の浮子測法での流量は1265.94 m<sup>3</sup>/sec、画像処理型流量は1283.04m<sup>3</sup>/secで誤差は1.4%であり、一致した流量が得られている。

#### (3) ピーク流量算定への課題

##### a) H-Q式の外挿値

観測開始時（8月31日5時）は水位下降期で、ピークでの観測ができなかった。この場合、流量観測データでH-Q式を算定し、ピーク時の痕跡水位からピーク流量を求めることができるが、H-Q式の外挿値となるため、外挿が可能かの水理学的根拠（小規模河床波による流水抵抗の分析）が必要になる。

##### b) 複雑な水理条件

太平橋の全流量 $Q_T$ は**図-9**に示すように、左岸破堤流入 $Q_L$ と本川の流量 $Q_m$ の合算値であるため、複雑な水理



図-6 標定点の設置

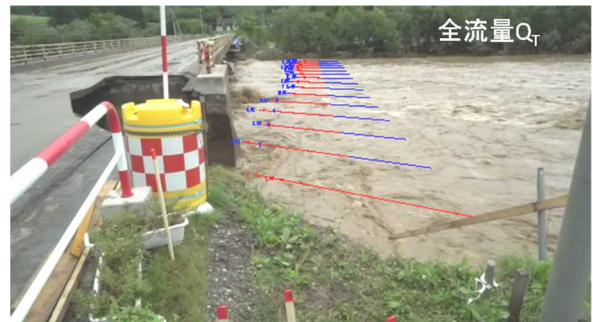


図-7 STIV法による流速算出（検査線）

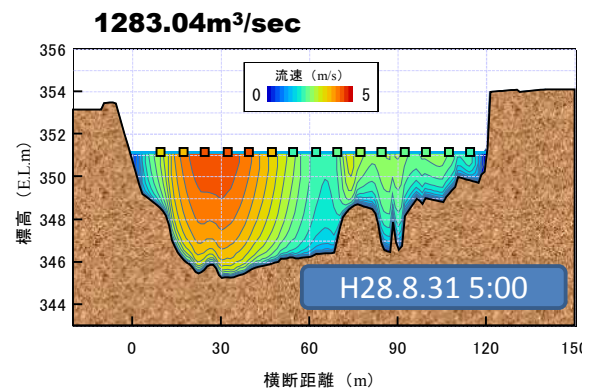


図-8 DIEX法による内外挿と流量算出（8月31日5時）

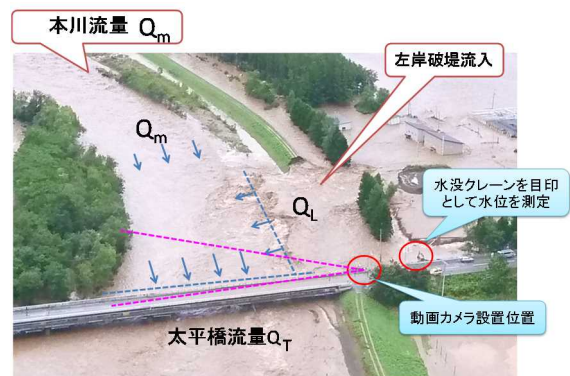


図-9 太平橋の流量配分

条件になっている。そこで、ピーク時の水理条件（小規模河床波による流水抵抗）を評価するには、左岸破堤流入量 $Q_L$ の影響を受けない本流 $Q_m$ で行う必要がある。よって、 $Q_m$ を算出するためには、左岸破堤流入量 $Q_L$ を算出する必要がある。



(4) 左岸破堤流入量  $Q_L$  の算出

左岸破堤流入量  $Q_L$  を算出するために、以下の検討を行った。

a)  $Q_L$  断面の設定

8月31日の現地観測時にみられた左岸の水面の乱れ位置に注目し、水位が下がった後日、現地踏査及び測量を行った。その結果、図-10に示すように低水護岸の位置と水面の乱れ位置が一致することが分かった。低水護岸は出水時の河床変動が少ないと推察されるため、ここを  $Q_L$  断面として設定することとした。

次に、図-11に示す破堤直後のレーザースキャナーによるLPデータ（寒地土木研究所提供）から低水路護岸ラインを抽出し、直線化して断面を設定した。

さらに、UAVの映像を分析すると、8月31日5時から6時の間に破堤長が延伸していることが判明したため、現地の家屋などの標定点を測量し、画像を幾何補正して破堤長の変化を測定した。図-12に示すように、破堤位置は5時30分には太平橋から70m、6時30分には太平橋から150mと上流側に進行しているが、6時30分以降は大きな変化がないことがわかった。

b)  $Q_L$  流速分布の算出

図-13に示すようにSTIV法を用いて、撮影されている画角内で、左岸破堤流入の流下方向に検査線を設定し、表面流速を算出した。次に、表面流速（青線）を  $Q_L$  断面に直交する流速ベクトル成分（赤線）に変換した。

c)  $Q_L$  流量の算出

$Q_L$  断面を用いてDIEX法により、STIV法で得られた表面流速を内外挿して流量を算出した。破堤の進行については図-14に示すように、堤防箇所は死水域として計算した。ここで、STIV法で得られた流速データは左岸側の狭い範囲に限定されているが、 $Q_L$  断面の最深部の表面流速が実測されている。橋場ら<sup>6)</sup>によるとDIEX法では最大流速が最深部で発生する条件であれば測点が少なくても流量精度が高くなる事例が示されており、今回もその条件に合致しているため適用できると判断した。

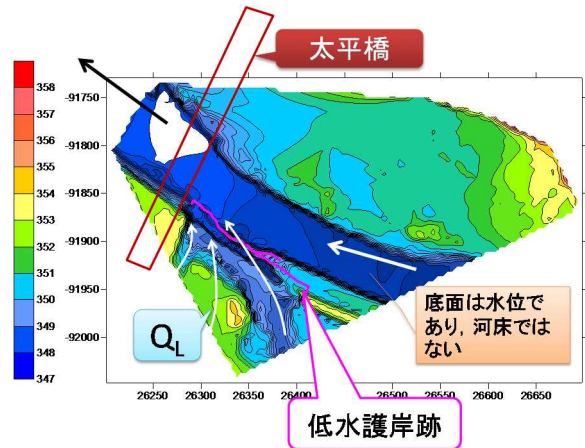


図-11 LPデータからの低水護岸抽出



図-12 破堤長の変化

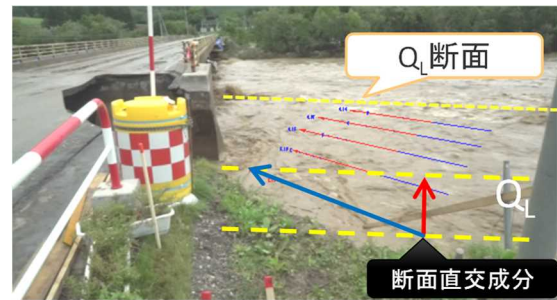


図-13  $Q_L$ 断面の流速分布と断面直交成分



図-10 左岸破堤流入  $Q_L$  断面の設定

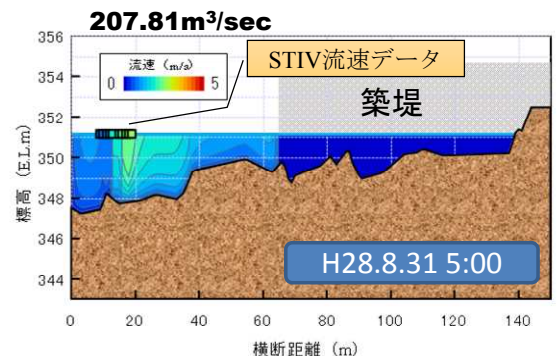


図-14  $Q_L$ 流量の算出 (8月31日5時)

#### 4. 流水抵抗を用いたピーク流量の算出

##### (1) 河床形態と流れの抵抗

流量の連続データは、年間36回等の流量観測で得られた水位と流量の関係式（H-Q式）を用いて、観測所で連続観測された水位から流量に変換して得られている。しかし、洪水中は水位と流量が一対一に対応しない現象がよく見られる。これは、洪水の非定常性と小規模河床波の発達による流水抵抗の変化が挙げられる。

河床には土粒子、水深、川幅スケールなどの多様な波数成分から攪乱が発生し、各種の河床形態が形成される。この中で小規模河床波と呼ばれるものに、図-15に示す、砂漣（ripples）、砂堆（dunes）、反砂堆（anti-dunes）があり、砂堆と反砂堆の間には平坦河床と呼ばれる遷移河床形態がある。洪水時のような流れの剥離を伴うような河床形態は流水抵抗を大きく支配する。よって、洪水時の水位～流量の関係を的確に評価するためには、河床形態の形成に伴う流水抵抗の評価は不可欠である。特に、計画規模の大規模出水時においては、ピーク流量をH-Q式の外挿で算出するのは注意を要する。河床形態が遷移河床に移行した場合は、水位は下がるが流速が速くなる現象が発生するため、水位と流量の一義的な関係が成り立たなくなる。よって河床形態と流水抵抗を分析した上で流量を算出する必要がある。

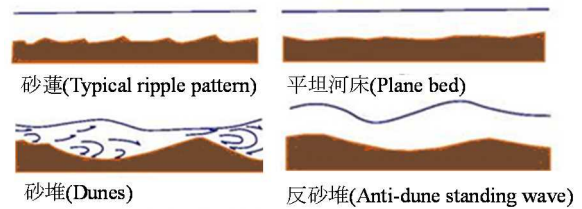


図-15 河床形態の変化

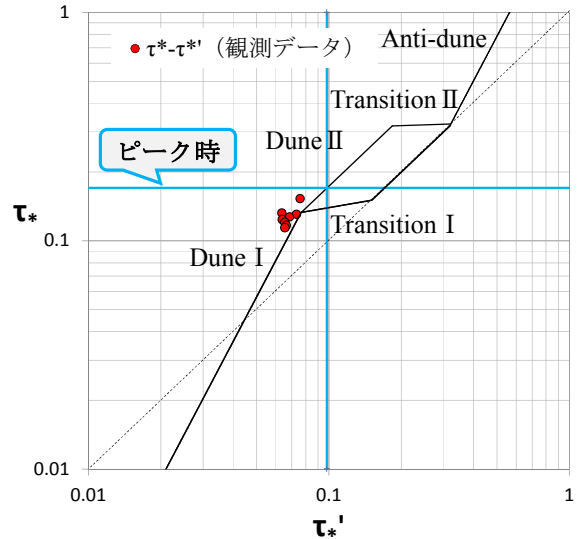


図-16  $\tau^* - \tau^{*}$  の関係

##### (2) 流水抵抗の分析

本研究では、岸・黒木<sup>7)</sup>が提案した無次元掃流力  $\tau^*$  と無次元有効掃流力  $\tau^{*}$  の関係に着目した分析を行う。

流量観測を実施した太平橋は上流左岸堤防の破損による堤内からの流入  $Q_L$  があるため、ピーク時の水理量を把握する地点としては条件が複雑になる。よって、本流の流量  $Q_m$  を  $Q_r$  と  $Q_L$  の差し引きから算出し、堤防損壊箇所の上流に位置する Kp1.0 断面で流水抵抗の分析を行うものとする。 $\tau^*$  と  $\tau^{*}$  の関係は以下の式(2)で示される。

$$\tau^* = \tau^* + \tau^{*} \quad (2)$$

これらはいずれも無次元数であるが、 $\tau^{*}$  は無次元掃流力のうち表面抵抗を、 $\tau^*$  は形状抵抗分を表している。

式(2)は、小規模河床波が発達して形状抵抗が増加すると、 $\tau^{*}$  が増加して  $\tau^*$  における  $\tau^*$  が占める割合が減少する関係にあることを示している。

$\tau^{*}$  を直接算出するためには小規模河床波の波高及び波長を得る必要がある一方で、 $\tau^* - \tau^{*}$  関係を分析することで小規模河床波を直接計測せずに流水抵抗を調べることができる。

ここで、 $\tau^*$  と  $\tau^{*}$  は式(3)、(4)の通りである。

$$\tau^* = \frac{RI}{sd} \quad (3)$$

$$\tau^{*} = \frac{R'I}{sd} \quad (4)$$

ここで、 $R$  : 径深、 $I$  : 勾配、 $s$  : 河床砂の水中比重 (1.65)、 $d$  : 河床砂の平均粒径、 $R'$  :  $\tau^{*}$  に対する径深である。河床砂の平均粒径 ( $d$ ) は、洪水直後の河床材料調査結果より、太平橋上流の左岸・右岸・中央の中央粒径  $d_{50}$  の平均値 (55.8mm=0.0558m) を用いた。なお、勾配 ( $I$ ) は実測値がないため、Kp1.0 と Kp0.75 の計画高水位 (Kp1.0 : 351.86m、Kp0.75 : 350.67m) から  $I=0.0048$  を一律として与えた。

$$\frac{v}{u^*} = 8.5 - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{R'}{k_s} \quad (5)$$

$$u^* = \sqrt{gR'I} \quad (6)$$

ここで、 $v$  : 平均流速、 $u^*$  : 摩擦速度、 $\kappa$  : カルマン係数 (=0.4 とする)、 $g$  : 重力加速度、 $k_s$  : 相当粗度 ( $k_s = md$ ) とする。

図-16 に 2016 年 8 月 31 日 5 時～12 時の 8 回の流量観測実測値から、岸・黒木が提案した  $\tau^* - \tau^{*}$  の関係をプロットした。なお、ここでは河床砂の粒度分布をもとに  $m=4.0$  を適用した<sup>8)</sup>。



観測データは河床形態がDune IIからDune Iに遷移する線上にプロットされており、遷移河床 (Transition) への移行はみられていない。また、ピーク時の $\tau^*$ を式(3)より算出 ( $\tau^*=0.172$ ) し、横線 (青) で示すが、ここでもDune IIの線上に位置することが予測される。

以上より、ピーク時には河床形態に大きな変化はなかったと推察できる。次にピーク流量を推定するには、痕跡水位ピークの $\tau^*$ を図-16にあてはめて $\tau^*$ を求め ( $\tau^*=0.098$ )、式(4)より $R'$ を算出する ( $R'=1.88$ )。次に、式(5)、(6)より平均流速 $v$ を算出 ( $v=3.15\text{m/sec}$ )して、 $Kp1.0$ の左岸堤外痕跡水位 ( $H=352.43\text{m}$ )の断面積 ( $A=432.04\text{m}^2$ )を乗じて流量 ( $Q=1360.83\text{m}^3/\text{sec}$ )を得た。

図-17に太平橋の時系列流量の一覧を示す。ピーク流量は流水抵抗から求め、5時~12時は画像処理型流量観測の実測値を示している。

図-18に示す $H-\sqrt{Q}$ 図より、太平橋の痕跡水位 ( $H=351.38\text{m}$ )を $H-Q$ 式に代入して得られた流量 (外挿値)は $1426.80\text{m}^3/\text{sec}$ となった。流水抵抗から算出したピーク流量 ( $Q=1360.83\text{m}^3/\text{sec}$ )と $H-Q$ 式から算出した流量の流量差は4.8%でよく合致している。これは、河床形態に大きな変化がなかったため、水位と流量の関係が成立しやすい水理条件であったことが推察される。以上より、流水抵抗を用いたピーク流量 ( $Q=1360.83\text{m}^3/\text{sec}$ )の妥当性が示された。

## 5. まとめと課題

本研究のまとめと課題を以下に記す。

- (1) 平成28年8月の空知川上流で発生した既往最大規模の出水では、幾寅水位流量観測所へのアクセスルートが水没し、水位計、CCTVなどの観測機器が失われ、すべての情報が取得できなくなった。
- (2) 急きょ下流の太平橋で浮子による流量観測を試みたが、橋の損壊により観測が不可能になった。画像処理型流量観測 (STIV+DIEX) は河岸の安全な足場で観測を継続することができた。なお、画像と浮子の流量は1.4%の誤差であり、十分な精度が確認できた。
- (3) 画像処理型流量観測 (STIV+DIEX) とUAV画像データを用いて左岸破堤流入量 $Q_L$ を算出することができた。
- (4) ピーク流量は画像処理型流量観測結果をもとに流水抵抗の分析 ( $\tau^*-\tau^*$ の関係)から $1360.83\text{m}^3/\text{sec}$ を算出した。

大規模出水時における非接触型画像処理型流量観測の適用性の高さが示された。今後は、計画規模を超える大規模洪水を想定した観測体制 (観測場所・観測手法等)を整備する必要があり、札幌開発建設部では画像処理型流量観測の実用化に向けた取り組みを進めていく所存である。

謝辞：本研究にあたり、土木研究所水工研究グループ水文チーム萬矢敦啓氏に多大なご指導をいただきました。

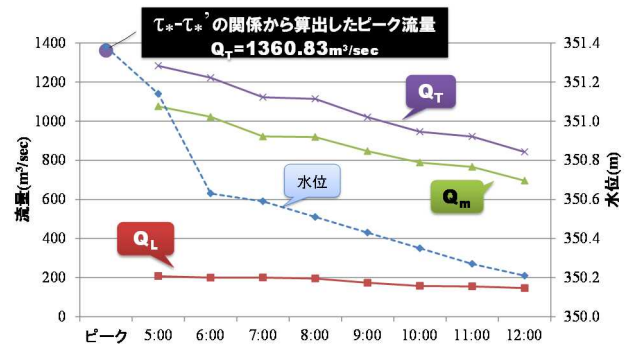


図-17 太平橋流量一覧

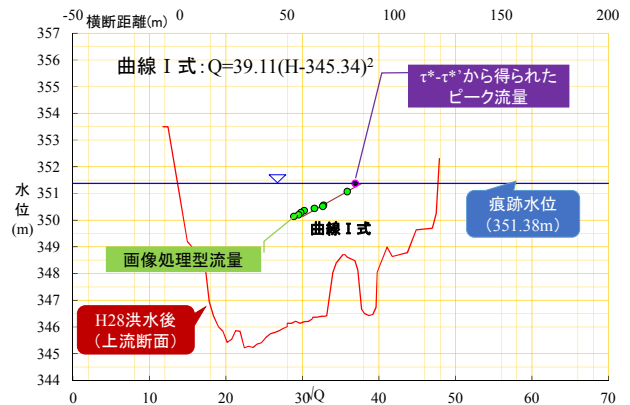


図-18 太平橋 $H-\sqrt{Q}$ 図

さらに神戸大学藤田一郎教授及び東京理科大学二瓶泰雄教授の開発された技術 (STIV法とDIEX法) がこのような非常時の観測を可能にしました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 藤田一郎・椿涼太：時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測，河川技術論文集，第9巻，pp. 55-60，2003。
- 2) 二瓶泰雄・木水啓：新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案，土木学会論文集，No. 803/II-73，pp. 155-160，2005。
- 3) 牧野賢太郎・得能泰治・橋場雅弘：画像処理型流量観測の適用性検討—大規模出水に対応した流量観測の高度化・効率化—，第59回北海道開発局技術研究発表会，技術一般，2015。
- 4) 工藤俊・萬矢敦啓・小関博司・岩見洋一：現場のための新しい水位-流量関係の構築に向けた基礎研究，河川流量観測の新時代，第5巻，pp14-21，2015。
- 5) 中津川誠：全体概要と気象・水文の状況，土木学会 2016年8月北海道豪雨災害調査団緊急報告会，2016。
- 6) 橋場 雅弘・二瓶泰雄・甲斐 達也・津田 哲也・土田宏一：DIEX法を用いた河川流量観測の簡略化に関する考察，河川技術論文集，第22巻，pp. 97-102，2015。
- 7) 岸力・黒木幹男：移動床流れにおける河床形状と流体抵抗 (I)，北海道大学工学部研究報告，pp. 1-23，1972
- 8) 芦田和男：河道の設計法(4) -河川の粗度について-，土木技術資料，1-7，1959。



# 沖波が全方位から来襲する港湾における 設計波及び岸壁上越波量の算定

平山 克也<sup>1</sup>・相田 康洋<sup>1</sup>・川口浩二<sup>2</sup>・藤木峻<sup>2</sup>

<sup>1</sup>港湾空港技術研究所 海洋研究領域 波浪研究グループ (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>2</sup>港湾空港技術研究所 海象情報・津波研究領域 海象情報研究グループ (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

深海域に囲まれた急峻な海底地形を有する離島港湾では、波はほぼ全方位から来襲する。本研究では、沖縄本島の東約360kmの海洋上に位置する南北大東港に対して波浪推算及び波浪変形計算を行い、各岸壁に対する設計波及び作用波を効率的に算定する手法を示すとともに、岸壁での越波量を推定した。波浪推算においては海洋上の孤島を敢えて海域とみなすことにより、逆に全方位の沖波の算定が可能となる。また、スペクトル法とのone-wayカップリングが可能なブシネスクモデルは、島による波の回折やトラップ効果を考慮した各岸壁への作用波だけでなく、岸壁上の越波浸水過程なども効率的に算定可能である。

キーワード 波浪推算, 波浪変形, WAM, 港内静穏度, ブシネスクモデル

## 1. はじめに

深海域に囲まれた海洋上の離島に来襲する波を考える場合、ほぼ全方位の波向が対象となるが、これらの沖波を定義する位置は、島自身による遮蔽の影響を受けない沖合で、かつ島を囲む複数地点として選定される必要がある。仮に、これを波浪観測で行う場合には、いずれも大水深域での対応となるため、技術面または費用面で多大な困難を伴う。したがって、このような離島の沿岸構造物に対する設計沖波及び作用波の見積りには、波浪推算及び波浪変形計算が多用されることになるが、上述した海洋上の離島特有の地形条件のために、それらの適用に際しては、離島特有の課題が存在する。すなわち、効率的に全方位の沖波を推算・算定し、島自身による遮蔽や回折の影響を考慮した岸壁への作用波を算定する必要がある。

そこで本研究では、沖縄本島の東約360kmの海洋上に浮かぶ南北大東島を対象として、両島のそれぞれ北、西、南に位置する岸壁への作用波とその沖波を推算・算定するとともに、適用上の留意点を明らかにした。すなわち、南北大東島は深海域に囲まれた急峻な海底地形ゆえに、沖合に防波堤を設置することが困難であり、岸壁に沖波が直接入射することから日常的に波高が高い。南北それぞれに整備された3地区の岸壁では天端の嵩上げ工事を順次実施しているものの、台風などの擾乱時には越波が度々発生している。そこで、算定された設計波を入力

とした波浪変形計算により、南北大東島各地区岸壁での越波流量を直接算定し高山・永井の推定式と比較し検証した。

## 2. 海洋における確率沖波の算定

### (1) 対象海域における16方位別高波擾乱の抽出

周囲20.8kmの南大東島と周囲13.5kmの北大東島を含む海底地形を図-1に示す。-1500m級の深海域から急勾配で駆け上がる独特な地形ということもあり、この海域ではNOWPHAS等による継続的な沖波観測は実施されていない。そこで、再現期間10年程度の確率沖波を方位別に推定するために、まず港湾空港技術研究所が所有している常時波浪推算データベースのうち当該海域における過去10年間(2003年～2012年)を参照し、このうち各波向で波高が上位となる代表20擾乱を抽出した。ここで、常時波浪推算データベースとは、気象庁から提供される客観解析値GPVに対してWAM Cycle 4による波浪推算を日本沿岸(第1領域)を対象に実施し、沖縄本島及び先島諸島を含む海域(第2領域)においては、空間解像度1/8°(約14km)の各計算格子上でone-wayネスティング計算を実施して算定される、有義波高・周期・波向を1時間毎に出力・整理したものである。この場合、大きさが格子間隔よりも小さい南北大東島地形は陸地として反映されないため、この格子での推算結果に対し最も近い沖縄本島南東側のNOWPHAS中城湾で採用されている高波基

準（上限値：2.0m，下限値：1.5m）を適用すると、この海域では波向に関係なく10年間に381擾乱が抽出された。

そこで、これらの各擾乱期間における16方位別の最大有義波高をそれぞれ降順に並び替え、方位別に上位1～3位及び各年の1位を採用するなどにより、各方位で上位の高波を発生させた代表擾乱を網羅的に抽出した。このように選定した20擾乱を表-1に示す。

(2) 海洋上の離島港湾を対象とした波浪推算

常時波浪推算における風から波のエネルギー輸送には波齢の影響を考慮したJanssenの理論を用いているが、擾乱時に適用すると波浪が過度に発達する場合があることが橋本ら<sup>1)</sup>によって指摘されている。そこで本研究では、風から波のエネルギー輸送量の計算にWuの式を用い、さらに沖縄本島及び南北大東島を含む空間解像度1/32°（約3.5km）の計算領域（第3領域）を設定した、WAM Cycle 3による波浪推算を改めて実施することとした。これらの計算条件を表-2に示す。

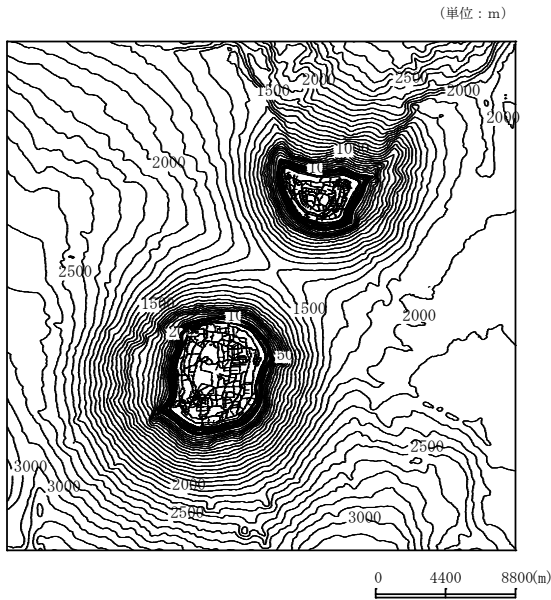


図-1 南北大東島周辺の海底地形

表-1 選定した代表20擾乱（2003年～2012年）

No.	擾乱名	期間	各年の1位
1	台風0310号	2003 08/05 16:00 - 08/09 21:00	○
2	台風0321号	11/22 00:00 - 12/06 13:00	
3	台風0406号	2004 06/17 07:00 - 06/22 08:00	
4	台風0416号	08/20 20:00 - 09/01 03:00	
5	台風0418号	2004 09/02 20:00 - 09/09 12:00	○
6	台風0423号	10/12 18:00 - 10/25 18:00	
7	冬型気圧配置	2005 01/14 00:00 - 01/18 06:00	
8	台風0514号	08/29 08:00 - 09/08 06:00	○
9	冬型気圧配置	2006 12/21 18:00 - 12/25 01:00	
10	台風0616号	10/01 08:00 - 10/11 08:00	
11	低気圧通過→冬型気圧配置	2006 12/16 21:00 - 12/31 03:00	○
12	台風0704号	2007 07/11 16:00 - 07/17 05:00	○
13	南岸低気圧	2008 05/11 02:00 - 05/21 07:00	○
14	台風0918号	2009 10/03 11:00 - 10/12 10:00	○
15	台風0920号	10/18 05:00 - 11/01 11:00	
16	台風1014号	2010 10/26 05:00 - 11/04 10:00	○
17	台風1106号	2011 07/15 14:00 - 07/22 06:00	○
18	台風1109号	07/31 09:00 - 08/10 01:00	○
19	台風1215号	2012 08/21 23:00 - 08/30 13:00	○
20	台風1217号	09/25 11:00 - 10/02 05:00	

ここで、第3領域の空間解像度においては両島はそれぞれ1つまたは2つの計算格子で表現可能である。

しかし、本研究では敢えてこれらの計算格子も海域とみなした。これは、両島の周辺がいずれも深海域であることを利用し、陸地による遮蔽の影響を受けない両島に対する全方位の沖波を両島の間地点で得るための工夫である。なお、高度10mの海上風は橋本ら<sup>1)</sup>にならない、擾乱時の気圧・台風分布をもとに、大気境界層モデルまたは傾度風・台風ハイブリットモデルを用いて推定した。

例として、WAM Cycle 3及びCycle 4による台風0418号来襲時の高波推算結果を図-2に示す。波向については、波高が小さい（風速が弱い）場合に違いが大きくなる期間がみられるが、両者は概ね一致する傾向にある。しかし、波高については、その他の擾乱も含め、Cycle 4による推算結果がCycle 3による推算結果よりも大きくなる傾向がみられた。さらに、NOWPHAS中城湾でこのとき観測されたピーク時（9/5 04:00）の波浪諸元は、波高7.81m、周期12.5mであった。位置や水深、周辺地形等が異なるため、南北大東島海域における推算結果をこの値と直接比較することは必ずしも適切でないが、それでもCycle 4により推算された最大有義波高16mはいささか大き過ぎるようである。したがって、Cycle 3による推算値のほうがより妥当と考えられる。

表-2 WAM Cycle 3による波浪推算の計算条件

領域No.	対象海域	領域情報(左下隅、右上隅座標)	格子間隔	水深考慮の有無
第1領域	日本全域	左下隅座標: 北緯15.0°・東経115.0° 右上隅座標: 北緯63.0°・東経170.0°	0.5° (1/2°)	なし(深海)
第2領域	沖縄本島周辺海域 先島諸島周辺海域	左下隅座標: 北緯23.0°・東経122.5° 右上隅座標: 北緯30.0°・東経133.0°	0.125° (1/8°)	なし(深海)
第3領域	南北大東島周辺海域	左下隅座標: 北緯25.5°・東経126.5° 右上隅座標: 北緯29.0°・東経132.0°	0.03125° (1/32°)	なし(深海)

方向分割数	32 (Δθ=11.25°)
周波数分割数	25 (最低周波数: FR(1)=0.04177248Hz≒24s)
風から波へのエネルギー輸送	Wuの式 ・波の発達が風速のみに依存する。 ・海面の状態を考慮していない(波齢の考慮なし)。
計算時間間隔	第1領域 900s 第2領域 300s 第3領域 60s
出力項目	有義波高、有義波周期、平均波向、方向スペクトル(9地点)
出力時間間隔	20分

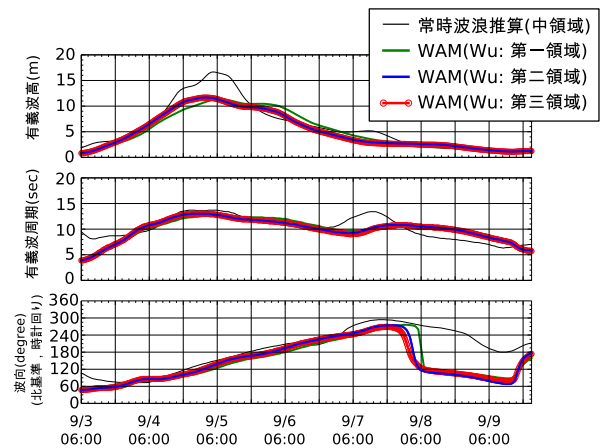


図-2 擾乱時の波浪推算結果の比較（台風0418号）

### (3) 海洋上の離島港湾に対する確率沖波の推定

南北大東島海域における確率沖波の推定には、9種類の確率分布関数のうち、DOL基準及びREC基準を満足し、MIR値が最も小さいものを最適な分布関数とする、合田による極値統計解析法を用いた。なお、極値データには常時波浪推算データベースから抽出された381擾乱のうち表-1に示す20擾乱の推算値をCycle 3によるものに入れ替えた極大値資料を用いた。また、有効統計年数10年間の方角別の高波総数を得るために設定する下限値には、基本的にそれぞれ方角別の年最大値資料の第10位の波高値を採用した。しかしながら、データ採択率が目安とされる0.15を下回った波向N及びNNEでは0.15以上となるよう下限値を調整した結果、方角別の高波総数はそれぞれ19～53、データ採択率は0.16～0.44であった。

このようにして得られた波高の極値データを波向別に極値統計解析し、得られた10年確率波諸元を図-3に示す。ここで、確率波高に対する周期は次式<sup>2)</sup>にて算定した。これは、波高と周期の相関解析を行い得た周期がすべて式(1)による値を下回り、物理的な妥当性を欠くと判断されたためである。

$$T_{1/3} \doteq 3.3(H_{1/3})^{0.63} \quad (1)$$

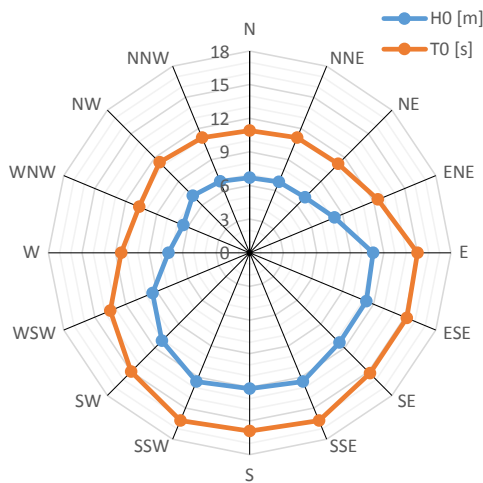


図-3 南北大東島海域での設計波（10年確率沖波）

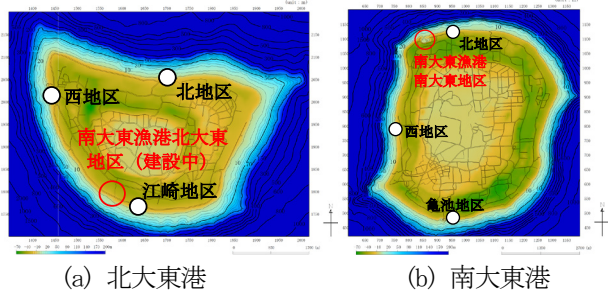


図-4 南北大東港各地区の位置

一方、南北大東港の各地区岸壁と南大東漁港各地区の位置を図-4に示す。両島とも、外郭施設を持たない各岸壁が波浪来襲頻度の高い島の東側を避けて配置され、特に、冬季風浪が卓越する時期には南側、台風時期には北側の岸壁が選択的に利用される。図-3はこれらの離島地形を考慮せずに算定されたが、これにより海洋上の深海域を対象とした波浪推算結果であるとみなせるため、このように1地点で全方位の沖波を推定することができる。なお、南北大東港の各岸壁では日常的に波高が高く接岸係留はほぼ不可能なため、岸壁沖に設けた2つの係留ブイを併用した岸壁近傍での係留荷役が行われている。

### 3. 海洋上の離島港湾に対する作用波の算定

#### (1) 海洋上の離島周辺の波浪変形計算

10年確率波に対するこれらの岸壁への作用波を算定するために、各方位の沖から島周辺の海底崖近傍までは回折を考慮したエネルギー平衡方程式法<sup>3)</sup>、海底崖沖から岸壁までは砕波・遡上・越波をも考慮できるブシネスクモデル<sup>4)</sup>を用い、かつ両者の接続境界ではone-wayカップリング<sup>5)</sup>を行うことにより、計算コストを抑制しつつ島による互いの遮蔽効果を考慮した全方位の波浪変形計算を実施した。例として波向Sのときの計算結果を図-5に示す。なお、潮位は全方位でH.W.L.(=D.L.+1.7m)とした。

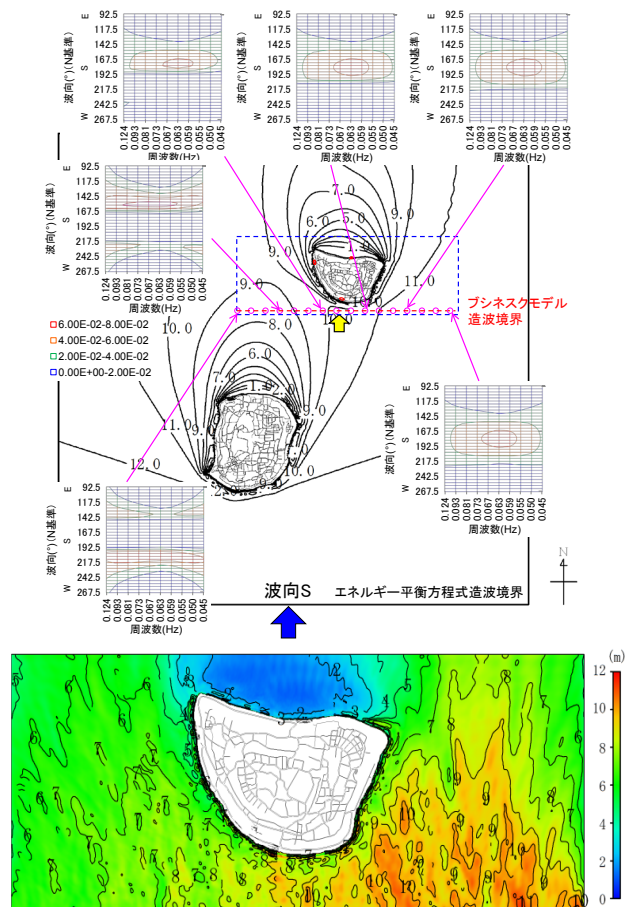


図-5 one-wayカップリングによる波高分布の算定結果



図の上段には、図-3に示す沖波諸元のうち波向Sに対する方向スペクトルを南大東島沖から入力し、エネルギー平衡方程式法により算定された有義波高分布を示す。ここで、沖波の方向スペクトルは、修正ブレットシュナイダー・光易型周波数スペクトル及び方向集中度 $S_{max}=10$ とした光易型方向関数により生成した。また、波の周波数分割数は10、方向分割数は36(5° 間隔)とした。このうち、破線で示した北大東島に対するブシネスクモデルの計算領域における、○印付実線で示したone-way接続境界上の各方向スペクトル(矢印による吹き出し)をみると、南大東島の遮蔽域から離れた東側では主波向に対しほぼ対称に波エネルギーが分布しているのに対し、遮蔽域に掛かる北大東島の正面ではW寄りの波エネルギーがみられなくなり、南大東島の直背後に位置する接続境界の西側ではS周辺の波エネルギーがみられなくなるなど、北大東島への入射波スペクトルに南大東島による遮蔽効果が適切に反映されている様子が確認できる。

一方、図の下段には、これらを入射し算定されたブシネスクモデルによる波高分布を示す。ここで、計算格子間隔は10m、時間差分間隔は $T_0/1000 \sim T_0/2000$ ( $T_0$ は沖波周期)とし、波の伝播後100 $T_0$ の計算時間を確保した。また、接続境界上の各方向スペクトルに対する広範な成分波諸元に対応するため、成分波数は1024波とした。図より、北大東島では波向Sに対し島の西側で南大東島の遮蔽効果による波高低減がみられるものの、東側ではその効果は限定的である。また、北大東島自身の遮蔽効果が期待される島の北側では、これらの波が屈折・回折し、島周辺の幅100m~200m程度の浅瀬(水深-10m~-20m)によるトラップ効果と思われる波高増大が確認できる。

## (2) 海洋上の離島港湾における卓越波向

図-5に例示したone-wayカップリングによる波浪変形計算を全16方位に対して実施し、南北大東港の各岸壁の沖約150mに設けた、2つの係留ブイのほぼ中間位置(水深-20m~-25m程度)で算定された有義波高を整理した結果を、沖波諸元とともに島ごとに重ねて図-6に示す。

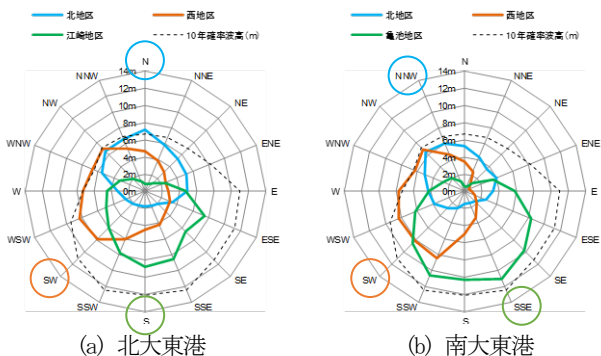


図-6 各方位に対する南北大東島の各岸壁沖での算定波高

ここで、岸壁を含む島の海岸線による波の反射は、ブシネスクモデルに導入された遡上・越波モデルにより斜面上の波浪変形に応じて自動的に再現されるものと仮定し、水陸境界には完全反射境界のみを設定していることに注意されたい。

南北大東港各地区の位置を示した前掲の図-4を参照すると、基本的には各岸壁ともほぼ正面から来襲する波による波高が相対的に大きい様子が見てとれる。特に、北大東港では北・西地区、南大東港では西地区において沖波とほぼ同等な波高が算定され、遮蔽等の影響を受けない沖波がそのまま来襲すると考えられる。一方、北大東港の江崎地区及び南大東港の北地区では、それぞれ前方の島による遮蔽効果を受けて来襲波高が幾分低減され、卓越波向が変化する。なお、S系の波が遮蔽を受けずに来襲する南大東港亀池地区で波高が低減する原因は、沖波波高が大きいために浅瀬上で砕波が生じたためである。

## 4. 海洋上の離島岸壁における越波流量の算定

10年確率波に対する各岸壁での越波浸水過程を詳細に再現するために、岸壁周辺の標高等も反映させた計算格子間隔5mの地形データを用い、図-6において○印で囲った波向に対するone-wayカップリングによる越波計算を実施した。ただし、計算範囲は岸壁を含む1.5km×3km程度とし、ブシネスク計算の効率化を図った。なお、計画中を含む各岸壁の諸元はどれもほぼ同様であり、岸壁長100m、前面水深D.L.-7.5m、岸壁天端高D.L.+6.0mである。

### (1) 越波量算定式による越波モデルの精度検証

越波モデルによる1次元の計算精度は平山・長谷川<sup>4)</sup>による検証例を参照できるものの、平面2次元波浪場での計算精度の検証は未だ十分でない。そこで、高山ら<sup>6)</sup>による越波流量算定式の近似式を用いて岸壁上の各計算格子における平均越波流量を算定し、越波モデルによる正の(岸壁へ乗り上げる)越波流量の平均値と比較した。ここで、越波流量算定式を適用する際に必要となる岸壁前面水深に対する換算沖波波高は、岸壁を含む海岸線からの反射波が生じないよう陸側に十分な幅のスポンジ層を設置したブシネスクモデルによる波浪変形計算を別途実施し、得られた岸壁前面での進行波高を合田による砕波帯内波高<sup>7)</sup>で割り戻して算定した。

また、海底勾配は、急勾配斜面に囲まれた島周辺の浅瀬(10~30m)での値を設定した。さらに、越波量の算定では、波の入射角に応じた換算天端高係数を用いて入射角が大きい場合に越波量が低減される効果を考慮した。

なお、南北大東港のそれぞれ北地区の岸壁では、岸壁床板に陸側に向かって下る勾配が設けられ、岸壁に打ち上がった越波水塊はその背後の排水路を通じて海側へ戻されるように設計されている。この排水路幅よりも広い

計算格子 (5m) を用いたブシネスクモデルでは、この排水効果を再現するため、排水路の断面積が一致するように、1格子幅でモデル化した排水路の地盤高さを底上げした。一方、その他の岸壁においても計算上、岸壁背後に同様の排水路を設定したが、岸壁床板の勾配は現地の状態に従い、海側に向かって下るように設定した。さらに、すべての岸壁において、排水路の有無を考慮した計算を実施した。

図-7から図-12の左側には、各岸壁でのブシネスクモデルにより直接算出された平均越波流量と前述の越波流量算定式により求めた越波流量を比較した結果を示す。

越波モデルによる計算値は近似式による推定値と比べ、島の北側で若干過小、島の西側と南側で若干過大評価となるものの、どちらの越波量もおおむね $10^1 \sim 10^2 \text{ m}^3/\text{s/m}$ 程度であり、その差は高々1オーダーであった。このうち、北大東港江崎地区および南大東港亀池地区では岸壁前面の進行波の統計解析により1m程度以上のサーフビート波高が生じることが判明している。したがって、越波モデルは算定式による越波量を過小評価する傾向があるものの、静的な統計量のみを扱う算定式とは異なり、サーフビートによる越波量の増大効果はある程度適切に評価できるものと考えられる。なお、南大東地区等のケースに見られる空間的な平均越波量の微変動は岸壁法線を階段状に近似したことによる影響と考えられる。

## (2) 岸壁上の越波浸水過程

算定される越波量の妥当性がある程度確認された越波モデルにおいて、その動的解析の利点を活用して時々刻々変化する波による岸壁上の越波浸水・排水過程を再現し、岸壁上の浸水深の時空間分布及びその平均値について検討した。図-13から図-18には、(a) 岸壁上に設定した代表点における浸水深の経時変化とその時間平均値、及び (b) 岸壁上の平均浸水深の経時変化とその時間平均値を示す。

浸水深の経時変化からは、越波により波が打ち込んだ際の浸水深は、代表点によっては瞬間的に3m程度にも達し、その後打ち込んだ水塊は岸壁上に拡散して広がっていく様子が見てとれる。さらに、岸壁床板の勾配が海側についている北大東港江崎地区や南大東港亀池地区などでは岸壁法線からの排水がまず促されることから越波水が岸壁上に長時間湛水する様子は確認されない。しかし、勾配が陸側についている南北大東港の各北地区の岸壁では、岸壁奥に向かって越波水塊が流れるため、排水路なしの場合には越波量に応じて徐々に浸水深が増加する傾向がある。ただし、排水路ありの場合には時間経過とともに浸水深が小さくなる様子が確認できることから、現在の排水路は岸壁上の浸水深及び浸水時間の軽減に寄与している事が確認できた。

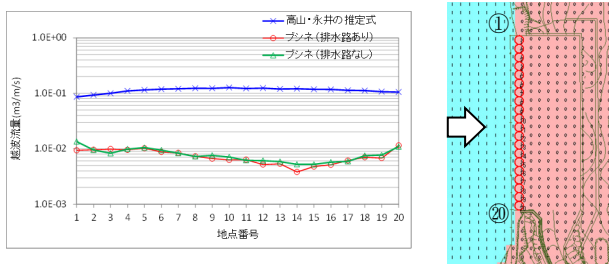


図-7 越波流量の比較 (北大東港北地区, 波向N)

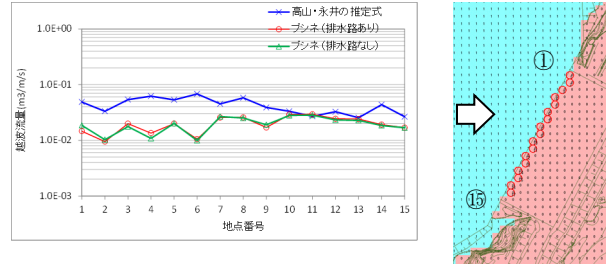


図-10 越波流量の比較 (南大東港北地区, 波向NNW)

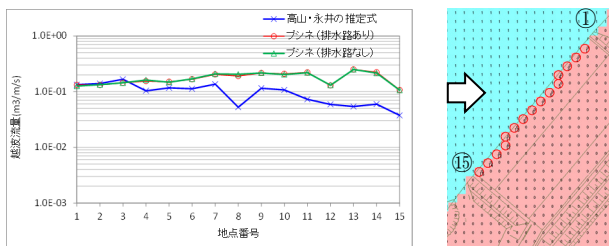


図-8 越波流量の比較 (北大東港西地区, 波向SW)

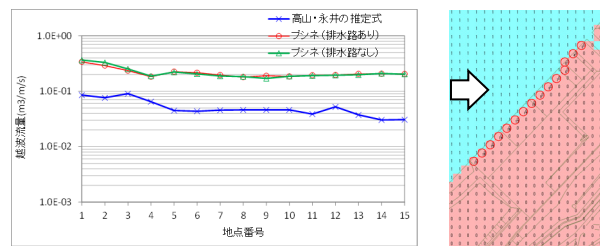


図-11 越波流量の比較 (南大東港西地区, 波向SW)

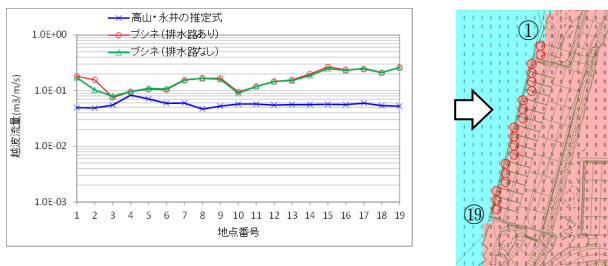


図-9 越波流量の比較 (北大東港江崎地区, 波向S)

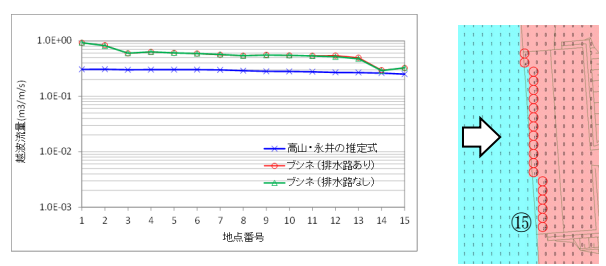
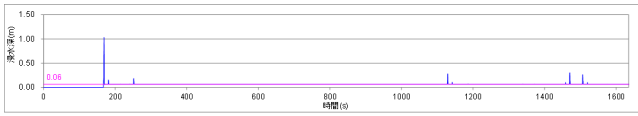
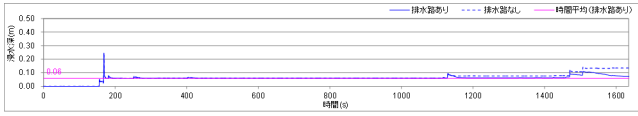


図-12 越波流量の比較 (南大東港亀池地区, 波向SSE)

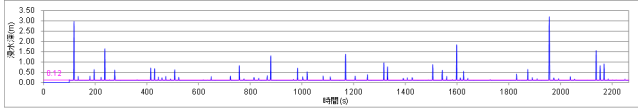


(a) 代表点における浸水深の経時変化とその時間平均値

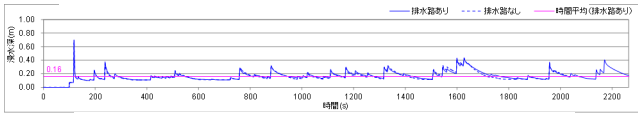


(b) 岸壁上の平均浸水深の経時変化とその時間平均値

図-13 越波流量の経時変化 (北大東港北地区, 波向N)

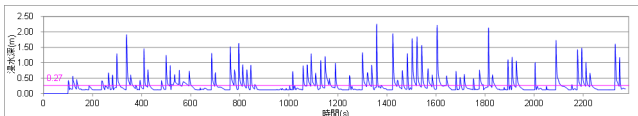


(a) 代表点における浸水深の経時変化とその時間平均値

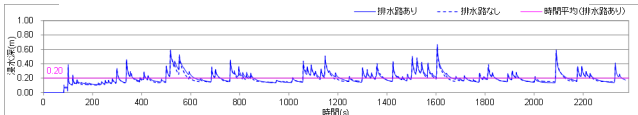


(b) 岸壁上の平均浸水深の経時変化とその時間平均値

図-14 越波流量の経時変化 (北大東港西地区, 波向SW)



(a) 代表点における浸水深の経時変化とその時間平均値



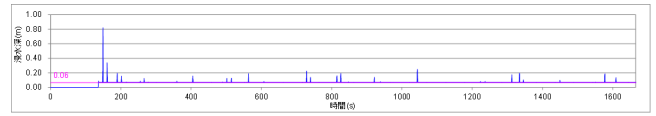
(b) 岸壁上の平均浸水深の経時変化とその時間平均値

図-15 越波流量の経時変化 (北大東港江崎地区, 波向S)

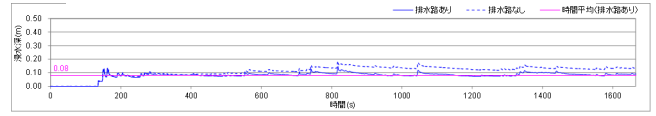
なお、南北大東港における岸壁上の(時間)平均的な浸水深は最大で30~40cm程度であるが、越波水の打ち込みによる波が岸壁上を断続的に伝播していくため、この波力により岸壁上の蔵置物の破損や流出等が発生する可能性が高く、岸壁における利用上の安全性が著しく低い状況であると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、擾乱時の波浪推算法とone-wayカップリングによる波浪変形計算法を用いて、海洋上の離島特有の地形条件を考慮しつつ離島港湾における全方位の確率沖波及び作用波を効率的に算定する手法を示した。また、算定された設計波を入力とし、南北大東島各地区岸壁での越波流量を波浪変形計算により直接算定した。越波モデルと高山・永井の推定式との比較では、越波モデルによる越波流量の過小評価傾向がみられるものの、時々刻々の越波計算によってサーフビートによる越波量の増大効果や岸壁上の越波浸水過程などもある程度適切に評価できるものと考えられる。

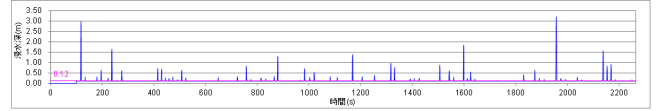


(a) 代表点における浸水深の経時変化とその時間平均値

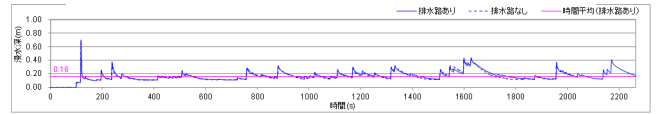


(b) 岸壁上の平均浸水深の経時変化とその時間平均値

図-16 越波流量の経時変化 (南大東港北地区, 波向NNW)

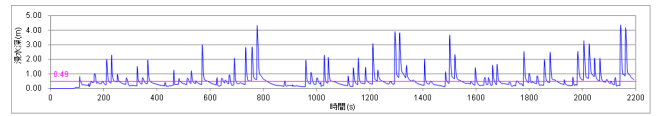


(a) 代表点における浸水深の経時変化とその時間平均値

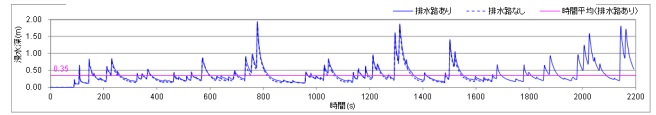


(b) 岸壁上の平均浸水深の経時変化とその時間平均値

図-17 越波流量の経時変化 (南大東港西地区, 波向SW)



(a) 代表点における浸水深の経時変化とその時間平均値



(b) 岸壁上の平均浸水深の経時変化とその時間平均値

図-18 越波流量の経時変化 (南大東港亀池地区, 波向SSE)

謝辞：本研究は、内閣府沖縄総合事務局の委託により実施したものである。また、現地の地形データの取得に当たっては、沖縄県のご担当者に大いに尽力いただきました。ここに記し謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 橋本典明, 鈴木勝之, 永井紀彦: 2004年に発生した台風に伴う高波の推算, 港空研資料, No.1102, 46p, 2005.
- 2) Goda, Y.: Revisiting Wilson's formulas for simplified wind-wave prediction, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, Vol.129, No.2, pp.93-95, 2003.
- 3) 間瀬 肇, 高山知司, 北野利一, 森安里夫: 位相平均波浪変形解析モデルへの回折効果のモデリングと適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.66-70, 1999.
- 4) 平山克也, 長谷川巖: プシネスクモデルによる護岸越波・浸水過程に関する再現計算, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.67, No.2, pp.I\_262-I\_267, 2011.
- 5) 平山克也, 岩瀬浩之, 加島寛章: 任意水深の造波境界上に分布する複数の方向スペクトルによる多方向不規則波の造波, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.011-015, 2010.
- 6) 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港研報告, 第21巻, 第2号, pp.151-205, 1982.
- 7) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp.59-106, 1975.



# 津波火災被害を推定するための 数値計算モデルの開発

千田 優<sup>1</sup>・高川 智博<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 津波高潮研究グループ  
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>2</sup>国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 津波高潮研究グループ  
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

東日本大震災では、津波の浸水域やその周辺で津波に起因する火災、いわゆる津波火災が発生した。将来の津波火災被害への対策を講じるためには、津波火災の危険性を適切に評価できる手法が必要である。近年統計的手法を用いた評価手法はいくつか提案されているが、津波の発生から火災の鎮火までの一連の現象を数値計算で推定する研究例はこれまでほとんど存在していなかった。そういった背景の元、近年著者らは津波火災被害を予測する数値計算モデルの開発に取り組んでいる。本論文では、東日本大震災時の津波火災の概要や発生・延焼要因について解説するとともに、開発している津波火災の数値計算モデルについて紹介を行う。

キーワード 津波火災，津波漂流物，被害予測，モデル開発

## 1. はじめに

2011年東日本大震災では、巨大津波が太平洋沿岸部を襲い、人的・経済的に甚大な被害を発生させた。津波によって漂流物と化した船舶、自動車、家屋がれき等は、漂流中は陸上構造物への被害を拡大させる要因となり、津波が引いた後は陸上や海上に留まることで、避難・救援活動を難しくさせる要因となった。さらには、津波火災の発生・延焼の要因にもなった。津波に起因して発生した火災を津波火災<sup>1)</sup>といい、津波の浸水域やその周辺で数多くの津波火災が発生した。津波により流出した大量の油類が火災の延焼を助長したと推測されている気仙沼湾での海上火災<sup>2)</sup>や、住民が避難した小学校に延焼した石巻市での火災<sup>3)</sup>などの事例が報告されている。

今後発生が懸念されている巨大地震津波における津波火災被害への対策を講じる必要があるが、今津ら<sup>4)</sup>が指摘するように津波火災の発生メカニズムや延焼要因に関する研究は、東日本大震災以降に本格化してきた。そのため、現状は科学的な知見を蓄積している段階である。

これまで提案されている津波火災のリスク評価手法として、ある範囲内の出火件数や火災危険度をマクロ的に予測するもの<sup>5)6)</sup>や100mメッシュによる局所的な火災リスクを推定するもの<sup>7)</sup>が挙げられるが、津波の発生から火災の鎮火までの一連の現象を数値計算で推定する研究はこれまでほとんど存在していなかった。そういった背

景の元、著者らは津波火災被害を予測する数値計算モデルの開発に取り組んでおり、その第一段階として海上で延焼が拡大する津波火災モデルの構築を行った<sup>8)</sup>。

本論文では、これまでの調査や先行研究で明らかになってきた東日本大震災時の津波火災の概要や発生・延焼要因について解説するとともに、開発した数値計算モデルについて紹介を行う。

## 2. 東日本大震災時の津波火災の概要と発生・延焼要因について

### (1) 東日本大震災時の津波火災の概要

廣井<sup>9)</sup>は、日本火災学会東日本大震災調査委員会・火災状況調査WGにより行われた東日本大震災時の火災に関する大規模なアンケート調査を分析した。それによると、東日本大震災時に発生した火災374件のうち、津波火災は159件あり、中でも宮城県で99件、岩手県で29件と全体の約8割ほどの津波火災がこの両県で発生した。

今津ら<sup>4)</sup>によって算出された市町村別の延焼面積・延焼箇所数の結果によると、海上火災に至った気仙沼市では、発生箇所数が特に多くなっていた。これは後述するように、着火した漂流物が海上を漂った影響であると考えられる。また、大規模な市街地火災に至った山田町中心部では約17ha、大槌町中心部では約13haもの火災被害が生じたことを明らかにしている。他にも避難施設に延

焼した石巻市の事例<sup>3</sup>や山林などの非浸水区域に延焼した大槌町での事例<sup>9</sup>が報告されている。

## (2) 津波火災の発生・延焼要因

大規模アンケート調査やその他の目撃情報から津波火災の発生・延焼の要因を以下のように整理できる。

出火するには、燃料と点火エネルギーが必要である。津波火災時における燃料は、漂流物の衝突等により流出した家庭用LPGボンベや車両から漏れ出たガソリン等が挙げられる。点火エネルギーは、漂流物同士の衝突により生じる衝突火花や電気ショート等が挙げられる。これらの条件が揃うことで出火に至るが、出火して一時的に火災が生じたとしても、燃料が尽きた時点で自然鎮火するため、燃焼が継続するかどうかは可燃物の供給が継続的にあるかどうかの影響を受ける<sup>2, 4</sup>。可燃物は、津波により破壊された家屋から生じる木材がれきや残存家屋、津波により破壊されたオイルタンクから流出した重油等である。海上火災が発生した気仙沼湾では、流出油とがれきが混ざったものが着火し、その着火物が津波や風に流され市街地や湾内を漂うことにより、延焼が拡大する要因になったといわれている<sup>2</sup>。一方、岩手県山田町中心部や大槌町中心部で発生した火災では、流失した家屋がれきが高密度で堆積した場所に着火し、火災が周辺のがれきや残存家屋に燃え移ることで延焼が拡大した。図-1は、山田町における東日本大震災時の建物分布<sup>10</sup>、最大浸水深<sup>10</sup>、延焼範囲<sup>9</sup>を示したものである。津波により流失した建物は沿岸部に集中しており、大量の可燃物が発生したこと、延焼範囲には流失した家屋と残存家屋が混在して分布していることが分かる。遡上した津波のエネルギーが減少した箇所には、沿岸部から漂流してきた

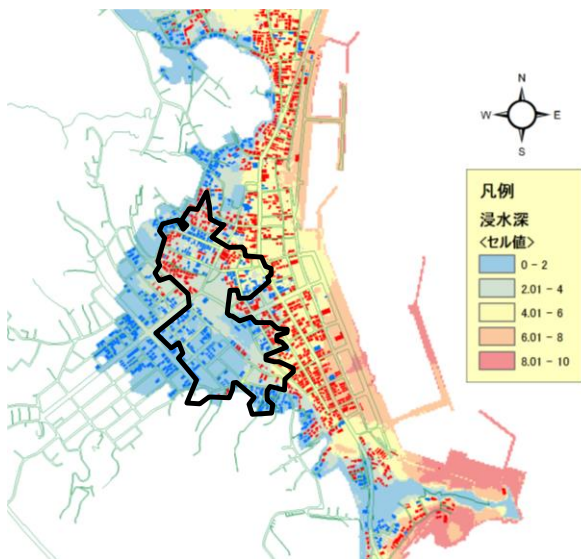


図-1 山田町における東日本大震災時の建物分布（赤：基礎だけ残して流失，青：それ以外），最大浸水深，延焼範囲（黒実線内）

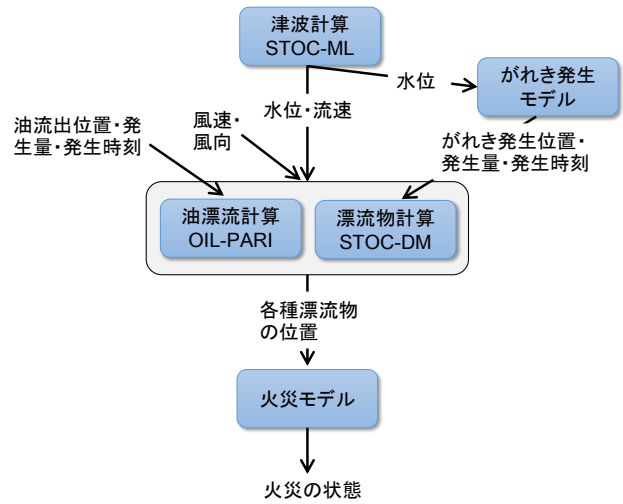


図-2 津波火災モデルの全体フロー

大量の家屋がれきが高密度で堆積した結果、可燃物が継続的に供給され、延焼範囲が拡大したと推測される。気仙沼市の鹿折地区で発生した火災においても同様の特徴を示していた。

一方で、山田町と同程度の家屋がれきが発生したにもかかわらず、火災が発生しなかった地域が宮城県女川町である。リアス式海岸特有の地形を有している女川町では、狭い低平地に密集した家屋のほとんどが津波で流失した。しかしながら、津波のエネルギーが減衰しながら遡上する範囲が狭かったことから、発生した家屋がれきは陸上に留まることなく、引き波によって海上に流出したと推測される。

また、浸水区域では消防施設も被害を受けており、消防水利の確保が困難であること、陸上に留まる様々な漂流物によって道路が閉塞され、火元に近づけないことも延焼を拡大する要因になる。

## 3. 津波火災被害を推定する数値計算モデル

### (1) 津波火災モデルのフロー

図-2は津波火災モデルの全体フローである。津波による流動場（水位および流速）は津波シミュレーター（STOC-ML）<sup>11</sup>を用いて算出する。津波伝播・浸水計算で得られた浸水深に基づいて、後述するがれき発生モデルから時々刻々変化するがれき量・がれき発生場所を推計する。発生したがれきおよび船舶・自動車は、STOC-MLにより計算された津波の水位・流速および風向・風速を入力データとした漂流物シミュレーター（STOC-DM）<sup>12</sup>により、漂流物として陸上あるいは海上の移動を計算する。油の移流・拡散は、油漂流シミュレーター（OIL-PARI）<sup>13</sup>を用いて計算する。このモデルでは、ある一定量の油の集合をひとつの油粒子として表現し、粒子間の相互作用と粒子に働く外力によって各油粒子の運動をラグランジュ的に追跡する。ここでは、外力として風向・風速お

表-1 がれきの燃焼状態

がれきの燃焼状態	フラグ値
発火する前の状態	0
燃焼している状態	1
鎮火した状態	2

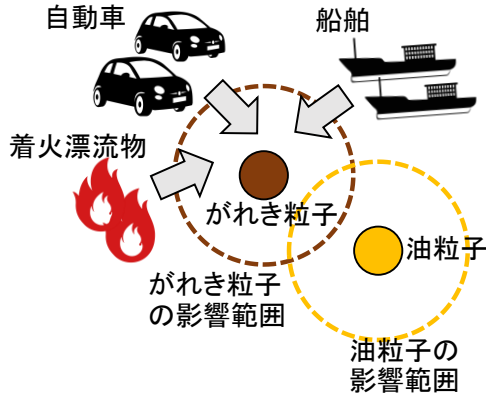


図-3 火災の発生モデル

表-2 浸水深と家屋の被害発生率の関係<sup>13)</sup>

浸水深 (m)	各レベルでの家屋被害発生率 (%)	家屋の累積被害発生率 (%)
0.5~1.0	5	5
1.0~1.5	15	20
1.5~2.0	25	45
2.0~3.0	45	90
3.0以上	10	100

よび津波シミュレーターで得られた流速を与えた。時々刻々計算されるがれきおよび油の漂流状況を後述する火災モデルに入力することにより、津波火災の発生・延焼・鎮火を計算することができる。

## (2) 火災モデル

火災モデルでは、ある一定量の可燃物の集合を一つの粒子とみなして、このがれき粒子の運動をラグランジュ的に追跡する。油粒子と混合したのがれき粒子一つ一つの燃焼状態は、表-1に示す分類にしたがって決定される。がれき粒子が発火した場合にフラグが0から1に更新され、燃焼が終了した場合にフラグが1から2になる。油粒子とがれき粒子の混合状態とは、図-3に示すように、それぞれの粒子に影響範囲を仮定し、それらが重なった状態のことをいう。発火の前提条件として、油と混合したのがれき粒子の影響範囲の中に、①津波によって漂流した自動車・船舶がある場合と、②燃焼しているがれき粒子がある場合を仮定した。自動車・船舶による発火は確率的に生じさせる。一方、鎮火は、初期条件で与えたがれき粒子一つ当たりの体積（単位：m<sup>3</sup>/個）をがれきの燃焼速度（単位：m<sup>3</sup>/s）で除算することにより、がれきが発火してから鎮火するまでの燃焼継続時間を算出し、発火し

てからの経過時間が燃焼継続時間になった時に鎮火するとした。

## (3) がれき発生モデル

がれきの発生条件は、表-2に示す浸水深と家屋の被害発生率<sup>13)</sup>の関係を用いることで、時々刻々の浸水深に応じてがれきが発生するものとした。予め1計算格子当たりに発生する最大がれき量を見積り、ある時刻における浸水深が表-2中にある各レベルの浸水深下限値を超えた際に、最大がれき量に各レベルでの家屋被害発生率を乗じた量に対応するがれき粒子を発生させた。

## 4. 現地適用

### (1) 計算条件

#### a) 津波の計算条件

A港を対象に津波伝播・浸水計算を実施した。計算領域を図-4に示す。計算領域は4段階のネスティング手法により空間解像度を高精細化した。それぞれの計算領域の計算格子サイズは、810m、270m、90mおよび30mである。対象津波は、愛知県防災会議による想定津波<sup>14)</sup>のうち「過去地震最大モデル」であり、その初期水位分布を図-5に示す。

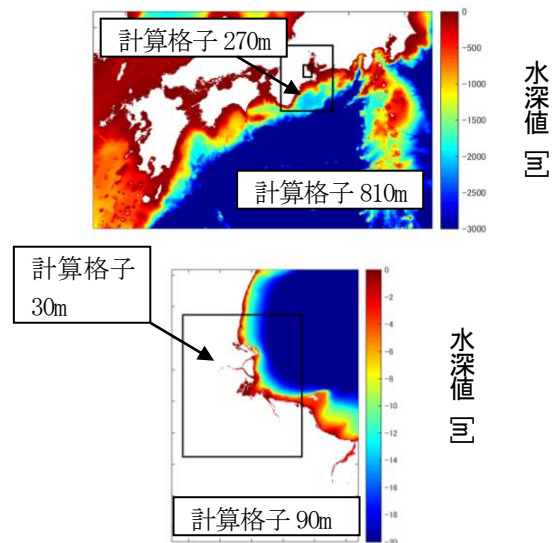


図-4 計算対象領域の地形図。カラーバーは水深値を示す。

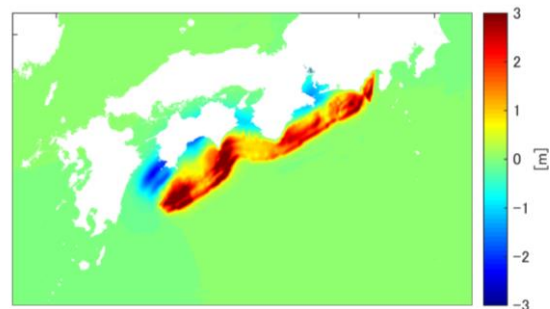


図-5 初期水位分布



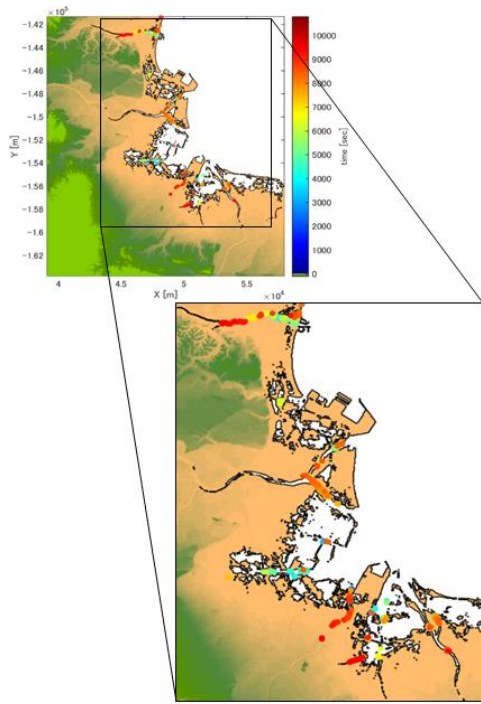


図-6 家屋がれきの分布と発生時間とその拡大図

表-3 油流出条件

項目	漁船	オイルタンク
流出開始時刻	漂流開始時刻	オイルタンク設置位置の浸水深が2.5mを超えた時刻
流出終了時刻	流出開始後1200秒後に終了	流出開始後1200秒後に終了

**b) 風条件**

伊勢湾・三河湾の海上風観測データを整理して得られた夏季（7月～10月）に発生する平均風速および比較的发生頻度の高い風向である西北西4.62m/sの一定風を計算領域全体に与えた。

**c) がれき・油・船舶の条件**

全国の土地利用状況について土地利用毎に整備した都市地域土地利用細分メッシュデータ<sup>10)</sup>から、低層建物および低層建物（密集地）を抽出したものを、がれきが発生する可能性のある家屋データとした。家屋データと前述した浸水深と家屋の被害発生率を組み合わせることで、家屋がれきを発生させた。図-6はその結果である。

本計算で考慮した船舶は漁船である。漁船および自動車の初期位置は、図-7(a)における黄緑色点で示す。

油が流出する対象物は、漁船および漁船用のオイルタンクであり、流出条件を表-3に示す。

**(2) 計算結果と考察**

図-7は、構築した津波火災モデルによる計算結果のうち、A港周辺を拡大したものである。図中黄緑色が漂流開始時および漂流中の自動車・漁船、濃緑が漂流停止した自動車・漁船、茶色が流出した油、黒色が発火していないがれき、赤色が燃焼状態のがれき、青色が鎮火したがれきを示している。津波の第1波が地震発生から約70分で到達した後、浸水とともにがれきが発生・漂流し、第1波が引くときにがれきが海上に流出する。海上に流出したがれきと油、さらに自動車が混合することによって、津波火災発生的前提条件が整い、地震発生から約90分で海上にて津波火災が発生する（図-7(b)）。その後、図-7(c)に示すように津波火災は拡大し、地震発生から150分にはがれきの燃え尽きも現れる（図-7(d)）。

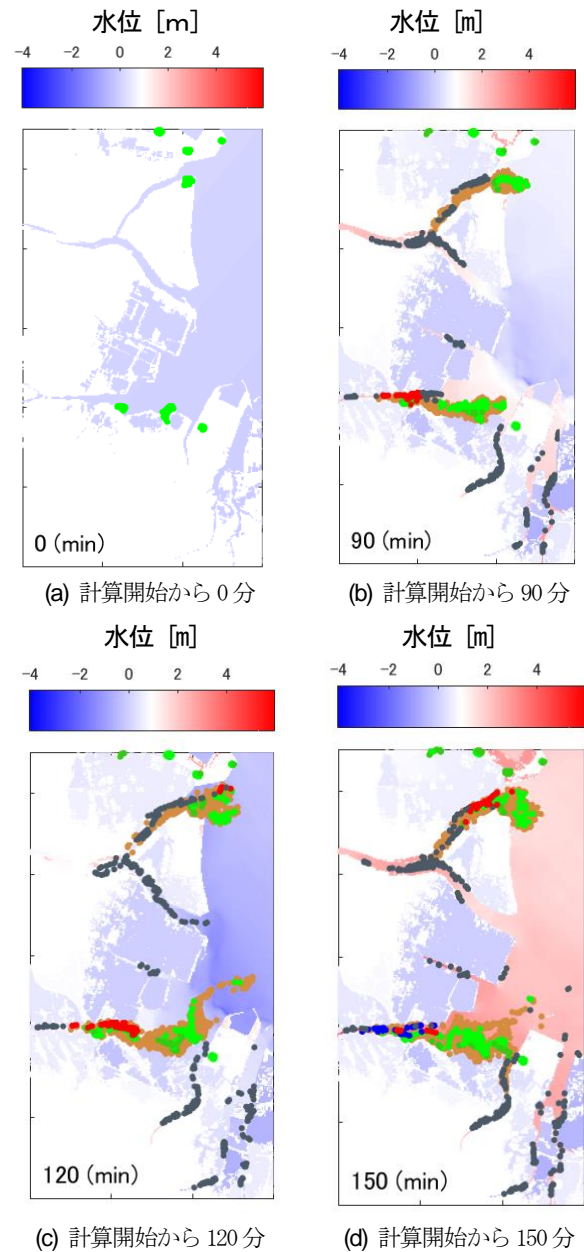


図-7 津波火災の計算結果。A港周辺を拡大（黄緑：漂流開始時もしくは漂流中の自動車・漁船、濃緑：漂流停止した自動車・漁船、茶：流出した油、黒：発火していないがれき、赤：燃焼状態のがれき、青：鎮火したがれき）。カラーバーは水位を示す。

た自動車・漁船、茶色が流出した油、黒色が発火していないがれき、赤色が燃焼中のがれき、青色が鎮火したがれきを表している。津波の第1波が地震発生から約70分で到達した後、浸水とともにがれきが発生・漂流し、第1波が引くときにがれきが海上に流出する。海上に流出したがれきと油、さらに自動車が混合することによって、津波火災発生的前提条件が整い、地震発生から約90分で海上にて津波火災が発生する（図-7(b)）。その後、図-7(c)に示すように津波火災は拡大し、地震発生から150分にはがれきの燃え尽きも現れる（図-7(d)）。

この計算では、残存家屋への延焼は考慮していないため、陸域における津波火災の拡大は考慮できていない。

また、船舶や自動車による発火確率など、種々の仮定について妥当性を検討できていない。しかし、複数の数値モデルを用いることにより、複雑ながれき・自動車・流出油の混合状態が解析可能となり、仮定した条件に対応した津波火災の発生、さらに津波により漂流するがれきや船舶・自動車にともなって海上で拡大する津波火災、そして鎮火する状況を計算できることが示された。

## 5. おわりに

本論文では、東日本大震災時の津波火災の概要、発生・延焼要因に関する解説と、開発中の津波火災モデルの紹介を行った。

個別に検討すべき課題はあるものの、津波火災という複合的な災害を複数の要素モデルの統合によりシミュレーション可能とした。今後は、気仙沼湾で発生した海上火災だけでなく、山田町や大槌町などで発生した津波火災にも対象を広げていく予定である。

**謝辞：**本研究は国土交通省中部地方整備局からの研究委託「平成27年度港湾における防災対策に関する研究委託」のもと実施され、データ提供などのご協力を頂いた。ここに深甚なる謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本火災学会：2011年東日本大震災火災等調査報告書【要約版】，2015年3月。
- 2) 関澤愛：東日本大震災における火災の全体像と津波起因火災の考察，消防科学と情報，No.108, pp.6-11, 2012.
- 3) 野竹宏彰，森田武，近藤史朗，広田正之，水落秀木：東日本大震災の津波火災における避難拠点建物の延焼拡大要因の分析と防火対策に関する考察，清水建設研究報告，第89号，2012.
- 4) 今津雄吾，野竹宏彰，北後明彦，今村文彦：東日本大震災で発生した津波火災における地形的影響の考察と津波火災危険度評価指標の提案，自然災害科学，Vol.33, No.2, pp.127-143, 2014.
- 5) 廣井悠：津波火災に関する東日本大震災を対象とした質問紙調査の報告と出火件数予測手法の提案，地域安全学会論文集，No.24, pp.111-121, 2014.
- 6) 西野智研，北後明彦：一般化線形混合モデルを用いた津波火災の発生件数の予測手法，日本建築学会環境系論文集，Vol.80, No.718, pp.1105-1114, 2015.
- 7) 今津雄吾，野竹宏彰，関澤愛，山本治貴：東北地方太平洋沖地震時の津波瓦礫分布調査に基づく局所的津波火災リスク判定手法，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 72, No. 2, I\_1615—I\_1620, 2016.
- 8) 富田孝史，千田優：震災漂流物の漂流推定手法と津波火災の発生推定手法の開発，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol. 72, No. 2, I\_1615—I\_1620, 2016.
- 9) 小林悟志：2011年の震災津波による二次災害で発生した岩手県大槌町の山林火災の現状，自然災害科学，Vol.31, No.2, pp.145-153, 2012.
- 10) 復興支援調査アーカイブ：<http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>，2017年9月参照。
- 11) 富田孝史，本多和彦，千田優：高潮津波シミュレータ(STOC)による津波被害解析手法，港湾空港技術研究所報告，Vol.55, No.2, pp.3-33, 2016.
- 12) 松崎義孝：海上流出油の移流及び拡散に関する数値計算法の開発，港湾空港技術研究所資料,1300, 2015.
- 13) 中央防災会議：首都直下地震の被害想定項目及び手法の概要～人的・物的被害～，[http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku\\_wg/pdf/syuto\\_wg\\_butsuri.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/pdf/syuto_wg_butsuri.pdf)，(2016年5月閲覧)
- 14) 愛知県防災会議地震部会：愛知県東海地震・東南海地震・南海地震等被害予測調査結果，<http://www.pref.aic hi.jp/bousai/2014higaiyosoku/whitebooknew2.pdf> (2016年5月閲覧)
- 15) 国土交通省国土政策局国土情報課：都市地域土地利用細分メッシュデータ，<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b-u.html> (2016年5月閲覧)

# 濁水流下における濁度低下への河床材料の影響

本山 健士<sup>1</sup>・中西 哲<sup>1</sup>・石神 孝之<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国立研究開発法人 土木研究所 水工研究グループ 水理チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

洪水等によってダム貯水池内に流入した濁質により貯水池において濁水が長期間発生する事例が日本全国で確認されている。この濁水が下流に放流された際の流下範囲の予測手法構築を目的に河床材料によるフィルタリング効果に着目し室内実験より検討した。実験により、河床材料の粒径と濁度の減少係数に相関関係があることを確認し、減少係数の推定式を提案した。さらに、実河川に適用し、一部の区間で現地調査結果を再現できることを確認した。

キーワード ダム, 濁水, SS, 減少係数, 河床材料

## 1. はじめに

洪水等によってダム貯水池内に流入した濁質により貯水池において濁水が長期間発生する事例が日本全国で確認されている。この濁水が下流に放流された際の下流の濁度や影響範囲について、ダム事業における環境影響評価では、濁水の流下過程でのSSの沈降を考慮し式(1)に示す減少係数モデルにて予測されている<sup>1)</sup>。

$$E = E_0 e^{-Kt} \quad (1)$$

ここで、 $E$ : 下流地点のSS(mg/L)、 $E_0$ : 上流端のSS(mg/L)、 $K$ : 減少係数(1/s)、 $t$ : 流下時間(s)

しかし、この既存の手法は現地調査の実測値をもとに予測する帰納的な手法である。一方、ダム下流の河川では、ダム建設に伴う流入土砂の減少やダムからの土砂供給等により河道の物理環境が大きく変化していくことが予測される。よって、物理環境等を加味した演繹的な手法の開発が必要である。

そこで本検討では、濁水流下範囲の予測手法構築を目的に河床材料によるフィルタリング効果に着目し室内実験より検討した。

## 2. SS低減メカニズムに関する検討

### (1) 水路実験における実験概要

図-1 に実験に使用した循環水路の概要を示す。当水路は幅50cm・高さ70cmであり、循環装置としてポンプ2台を使用している。実験時にはポンプの水流などの影響のない区間を計測区間とし、この区間に異なる河床材料

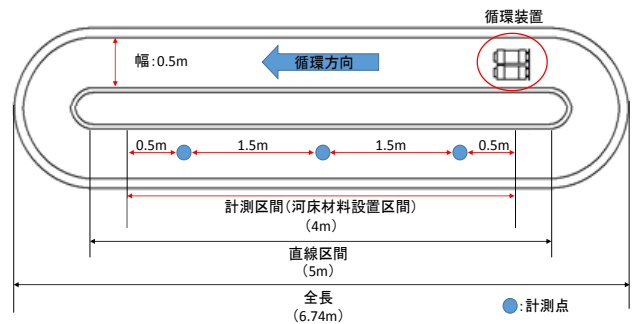


図-1 循環水路概要

表-1 実験ケース一覧

ケース番号	河床材料			平均流速 (m/s)	初期水位 (cm)	実験時間 (h)
	河床材料の粒径	空隙率(%)	層厚(cm)			
Case1	なし			0.23	54.0	48
Case2	10cm	36.6	6.5	0.22	50.5	
Case3	10cm,1cm	28.7		0.23	50.0	
Case4	10cm,1cm,1mm	23.4		0.23	48.5	
Case5	1cm	38.3	3	0.25	48.0	
Case6	3mm	38.8		0.25	45.0	

を設置し、河床材料ごとのSS低減への影響について検討した。表-1 に実験ケースを示す。濁水製作及び計測は、簡易に計測できる濁度を指標とし、濁度-SSの相関関係からSSを算出した。実験において使用している濁水はAダムの底泥を濁質の粒径が0.2mm以下、濁度が約40NTUになるように調整したものを使用した。図-2 に実験に使用した濁水の濁度-SS相関図を示す。ここで、case1~4とcase5,6で使用した濁水の濁度-SS相関が異なるのは、実験終了後に濁度が40NTUになるよう濁水を調整する作業を実施しているが、Case4終了後の濁度調整時に濁質等が変化し、濁度-SS相関が変化したものと思われる。

また、計測は濁度の空間分布を把握するため流下方向3点の計測点において、水面より5cm下・中央水深・底



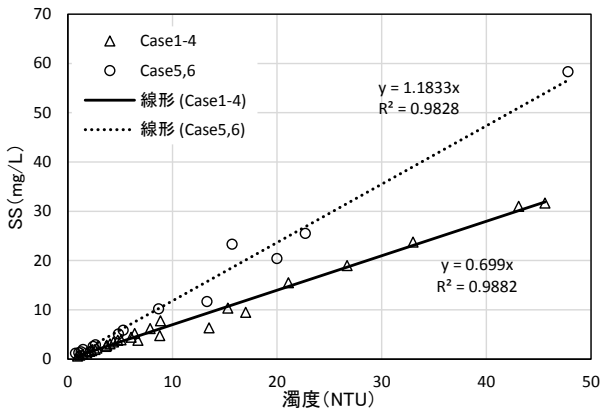


図-2 濁度-SS 相関

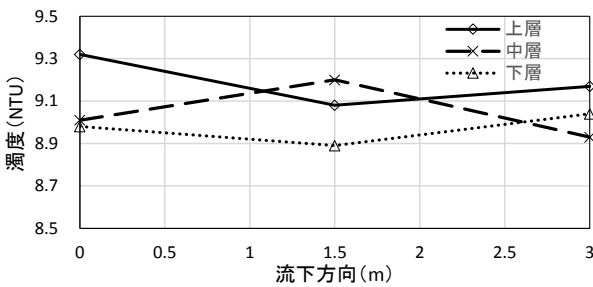


図-3 Case4、24時間後の計測結果

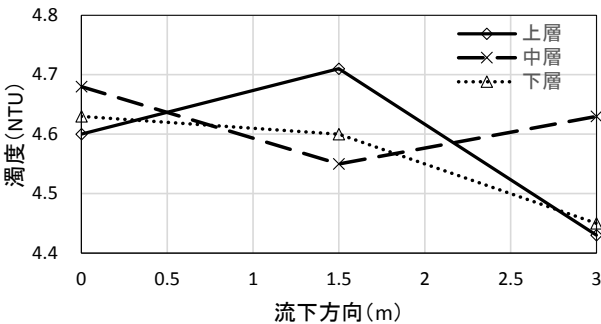


図-4 Case4、48時間後の計測結果

面より 5cm 上の水深の合計 9 点の濁度を計測した。

## (2) 水路実験における実験結果

図-3, 4 に Case4 実験時の 24・48 時間後における濁度の計測結果を示す。図に示すとおり、濁度の空間分布について、明確な傾向は見られなかった。よって、実験結果は各計測時間の濁度を全計測箇所で平均し、濁度-SS 相関より算出した SS を用いて整理した。図-5, 6 に全実験ケースの SS 経時変化を示す。図-5, 6 に示すとおり実験の初期条件等が異なるものの、Case1 の河床材料なしのケースでは、SS がほとんど低下していないのに比べ、Case2~6 の河床材料ありのケースでは、SS が低下していると同時に河床材料ごとに SS の低下量が異なることが分かる。

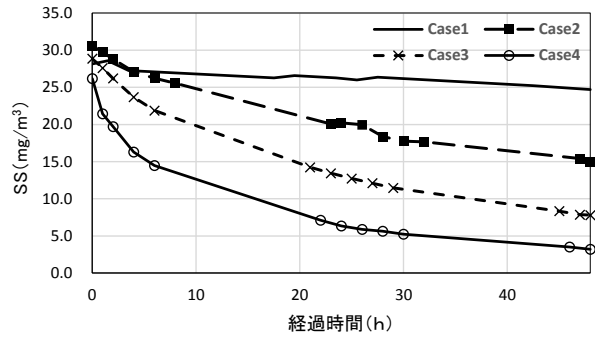


図-5 濁度の経時変化 (case1~4)

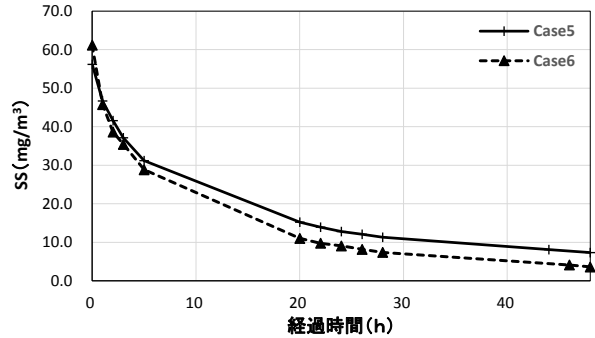


図-6 濁度の経時変化 (case5, 6)

## (3) 実験結果の考察

実験結果より SS の低下量には河床材料の影響があると考えられる。そこで実験結果を減少係数  $K$  を用いて整理した。本実験における減少係数  $K$  の算出方法を式(2)に示す。各実験ケースにおける減少係数  $K$  は式(2)をもとに最小二乗法を用いて解析した。解析には Python の数値解析ライブラリである scipy を用いた。また、河床材料ではなく、水路による濁質の低減の影響を考慮し、河床材料なしの実験より得られた減少係数をもとに補正した。

$$E = E_0 e^{-K\Delta t} \quad (2)$$

$$\Delta t = t(t_1/t_0)$$

$$K = K_0 - \dot{K}$$

ここで、 $E$ : 経過時間  $\Delta t$  における SS (mg/L)、 $E_0$ : 実験開始時 SS (mg/L)、 $K_0$ : 各実験における減少係数、 $\Delta t$ : 計測区間総流下時間 (s)、 $t$ : 実験時間 (s)、 $t_1$ : 循環水路一周のうち河床材料設置区間を流下する時間 (s)、 $t_0$ : 循環水路一周を流下する時間 (s)、 $K$ : 補正後減少係数 (1/s)、 $\dot{K}$ : 水路の減少係数 (1/s) (case1 より算出) を表す。

SS の低減する要因として、濁質の河床材料の空隙への吸収といったメカニズムがあると考え、減少係数と河床材料の空隙率の関係を整理したものを図-7 に示す。図に示すとおり、本検討の実験ケースの中では、空隙率と減少係数の間に明確な相関は見られなかった。また、空隙率がほぼ同一のケース (Case2, 5, 6) の減少係数を比較すると河床材料が小さくなるほど減少係数が大きく

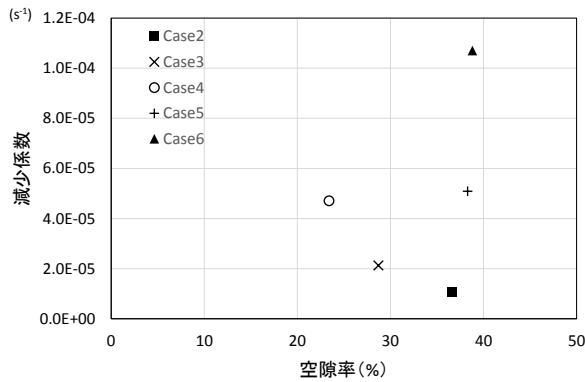


図-7 河床材料の空隙率と減少係数 K

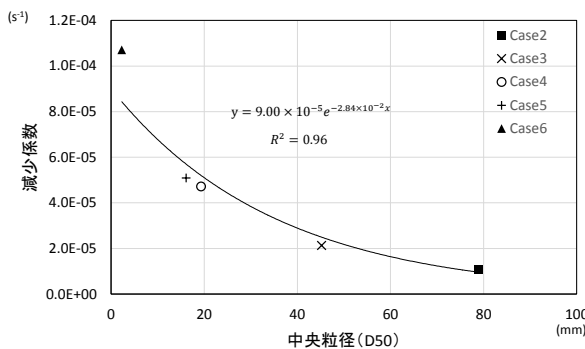


図-8 河床材料の中央粒径と減少係数 K

なった。

次に減少係数と河床材料の粒径の関係を図-8に示す。図に示すとおり、河床材料の粒径と減少係数の間に相関関係があることが分かる。河床材料による濁質のフィルタリング効果として、河床材料の空隙に濁質が吸収されると考え、室内実験より検討したが、空隙率との相関は見られず、河床材料の粒径が大きいと減少係数が小さいという相関関係が得られた。

河床材料中の流体挙動は浸透流、すなわちダルシー則におおよそ支配されるであろう。ダルシー則で流体場を規定するのは透水係数である。一般的に透水係数は個々の空隙の孔径の二乗に比例する。また代表粒径の二乗に比例する形でも表現される。空隙率は河床材料の空隙総量を示す指標であり、個々の孔径を表してはいない。よって、濁質が空隙に取り込まれたのちの浸透流場の挙動により、それぞれのケースで河床材料中の滞留時間が異なることによるためだと考えられる。

#### (4) 河床材料の影響を踏まえた減少係数の推定

実験結果を踏まえ、河床材料の粒径と減少係数 K の関係から、減少係数の推定式 (式(3)) を導出した。

$$K = ae^{-bx} \quad (3)$$

ここで、 $a, b$  : 係数 (実験より  $a=9.00 \times 10^{-5}$ ,  $b=2.84 \times 10^{-2}$ )、 $x$  : 河床材料の中央粒径 (mm) を表す。

本手法では出水やダムからの土砂供給等による河床材

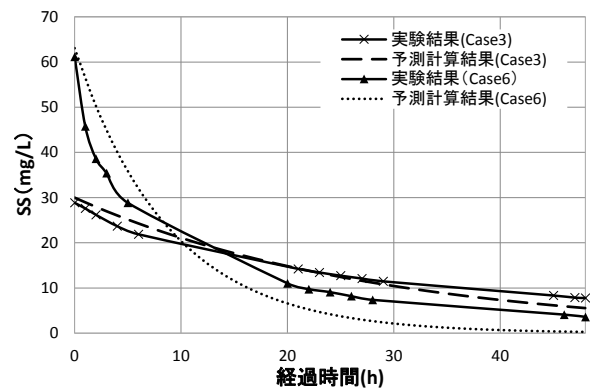


図-9 K 推定式による実験結果の再現

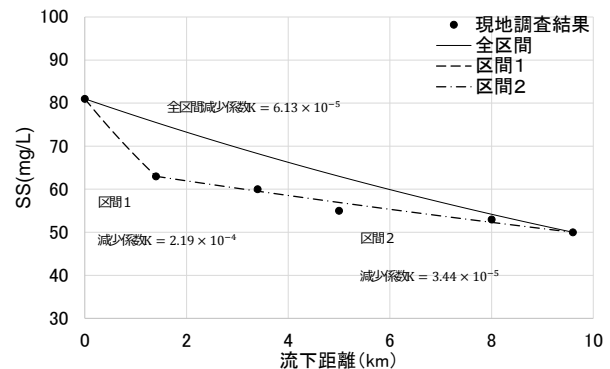


図-10 現地調査結果と既存手法の比較

料の変化に対応した予測が可能である。

河床材料による減少係数の推定式 (以下、K 推定式) の再現性を確認するため、実験結果との比較を行った。

Case3 および Case6 における比較検討結果を図-9に示す。図に示すとおり概ね実験結果と同程度となっているが、K 推定式に比べ、実験開始より 15~20 時間までは実験結果の濁度が小さく、それ以後は K 推定式による計算結果の濁度が小さい結果となった。これは、実験開始時より比較的粒径の大きい濁質より順に沈降していくため、初期は SS 低減が大きく、実験終了時は SS 低減が小さいためであると考えられる。

### 3. 実河川における K 推定式のケーススタディ

#### (1) 濁水流下範囲に関する現状分析

ダムから濁水が下流のどの範囲まで及ぶかを把握するため、2016年11月にBダム下流において現地調査を実施した。図-10に現地調査の結果を示す。調査は大きな支川流入のないBダムの下流約10kmの範囲において6地点を選定し、濁水を採水し濁度およびSSを測定した。図-10に示すとおり、濁水が流下していく過程において、SSが低減することを確認した。

Bダムにおける濁水の流下について既存手法を用いて

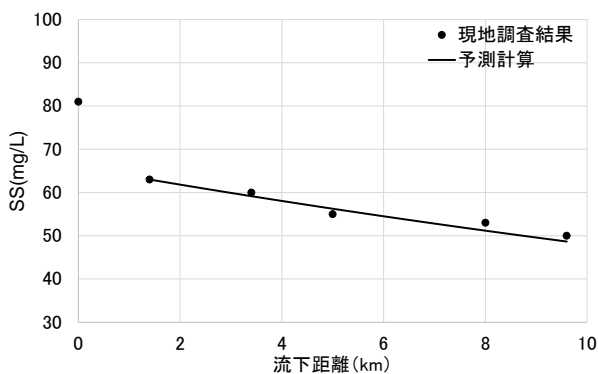


図-11 K推定式による予測計算結果の比較

分析した。既存手法減少係数の算出に必要な流下時間  $T(s)$  について、1次元不等流計算より平均流速を算出し、平均流速と流下距離から流下時間を算出した。また、減少係数は区間の上下流端の2地点より算出し、減少係数をもとに区間途中のSSを算出した。図に示すとおり0km地点と9.6km地点より算出した減少係数では、計算結果と現地調査結果が大きく乖離する結果となった。それを踏まえ、全区間を上流端より0km~1.4kmの区間1と1.4km~9.6kmの区間2の2つに分け、減少係数を算出し計算を行った。その結果、計算と現地調査結果がほぼ同程度となっている。

これより現地調査をもとに減少係数を算出する手法においては調査地点が重要であり、調査地点が異なることにより、減少係数及びSSの計算結果が大きく異なることが分かった。

## (2) 現地調査結果とK推定式の比較

K推定式および実験より算出された係数の適用性について検討するため、K推定式を用いたSS予測計算を実施した。予測計算に必要な河床材料の粒径は流下距離6km地点における平成25年度の調査結果より中央粒径30.01mmを用いた。また、現地調査の分析結果を踏ま

え、区間2を対象とし予測計算を実施した。予測計算結果と現地調査結果の比較を図-11に示す。図に示すとおり、K推定式による予測計算結果と現地調査結果は概ね同程度の値となっているが、区間1を対象にした場合、現地調査結果を再現することはできない。

よって、現地河川への適用については引き続き検討を進める必要がある。

## 4. まとめ

本研究では、ダム下流における濁水の流下に関する基礎的検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 河床材料による濁質のフィルタリング効果として、河床材料の粒径と減少係数に相関関係があることを確認した。
- 2) 現地調査の結果、既存の減少係数のモデルでは、上下流端の決定方法により減少係数が大きく異なるため、流下途中のSSの予測が困難である。

本検討においては、河床材料のフィルタリング効果によるSS低減について着目し、既存の減少係数モデルをもとに検討した。しかし、河川におけるSSの低減については、河床材料の粒度分布や河道形状・水理条件等の影響についても検討する必要がある。今後は、他の影響要因の分析やモデルの高度化等について、引き続き検討する必要がある。

**謝辞：**ダム下流における濁水に関する現地調査は、国土交通省、地方整備局等にご協力いただいた。ここに記して謝意を示す。

## 参考文献

- 1) (財)ダム水源地環境整備センター：ダム事業における環境影響評価の考え方、pIII-118~III-120、2000.3



# 関係市町と連携した 水防災意識社会の再構築について

豊原 裕子

関東地方整備局 下館河川事務所 調査課 (〒308-0841 茨城県筑西市二木成1753番地)

平成27年9月の関東・東北豪雨では、下館河川事務所管内の鬼怒川において、堤防決壊や溢水等により、広範囲かつ長時間の浸水が生じ、多数の孤立者が発生した。平成27年12月に策定された「水防災意識社会再構築ビジョン」に基づき、全国的にも今まで以上に、水防災への取り組みが展開されているところではあるが、本報告では、下館河川事務所オリジナルとして新たに踏み込んだ、流域一体となった水防災意識社会の再構築への取り組みについて紹介する。

キーワード 水防災意識社会, 水防, 自治体, 連携

## 1. はじめに

下館河川事務所が管理する鬼怒川では、平成27年9月の関東・東北豪雨において、堤防決壊や溢水等により、広範囲かつ長時間の浸水が生じ、多数の孤立者が発生した。これらを受けて、現在鬼怒川下流域（茨城県区間）において、ハードとソフトが一体となった緊急的な治水対策「鬼怒川緊急対策プロジェクト」を実施中である。

また、平成27年12月に策定された「水防災意識社会再構築ビジョン」に関係機関含め、流域一体となって取り組むため、事務所管内の自治体と連携を強化し、水防災に対する意識啓発をより一層強めていく取り組みを行っているところである。

全国的にも今まで以上に、水防災への取り組みが展開されているところではあるが、本報告では、事務所独自で考案し、先進的に実施し始めた取り組み事例について紹介する。



図-1 鬼怒川・小貝川流域図

## 2. 管理区間の特徴と洪水対応時の課題

### (1) 管理区間の特徴

下館河川事務所は、栃木県と茨城県にまたがる鬼怒川と小貝川を管理している（図-1）。その管理区間延長は、

鬼怒川約99.6km、小貝川約81.9km、合計約181.5kmと、関東地方整備局管内で最も長い区間となっている。更にこれら2河川は、北から南に向かって市町を縦断する形で概ね並行に流れており、関係する市町の数も24市町と非常に多くなっている。

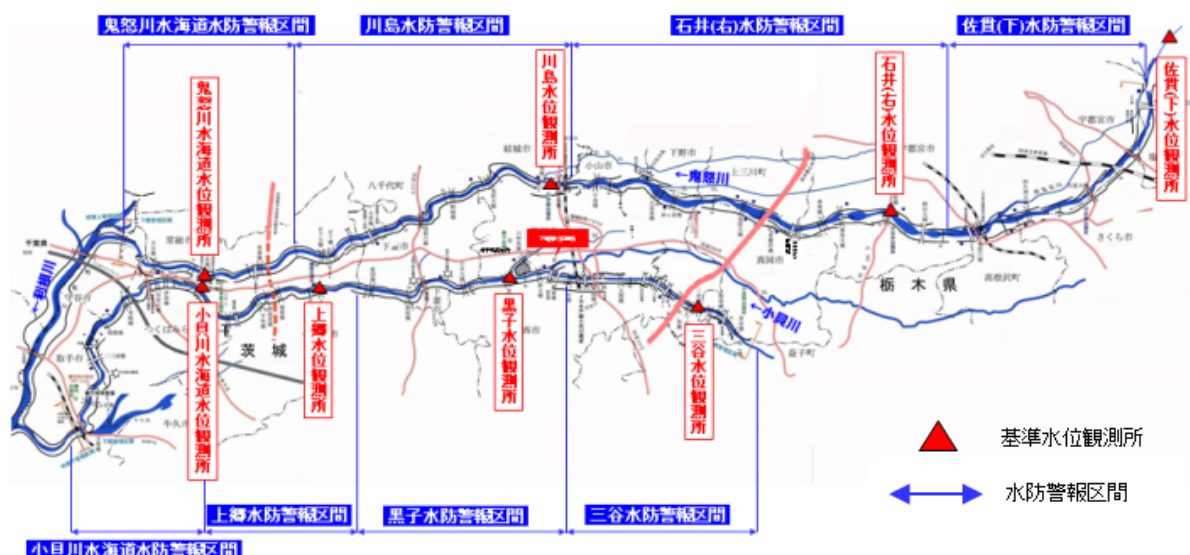


図-2 鬼怒川・小貝川における基準水位観測所とそれぞれの水防警報区間

鬼怒川は、過去に暴れ川として幾多の水害を起こしてきた河川であり、現在鬼怒川緊急対策プロジェクトにおいて対策を進めているところではあるが、まだまだ整備率が低い。小貝川においても、昭和61年に2箇所での堤防決壊を経験した河川であり、特に、上流域に洪水調節用のダムがなく、中流部において河床勾配が急激に緩くなるため、上流部では洪水時の水位の立ち上がりが高く、中流部では水位が上昇しやすい特徴を持っている。更に、気象条件が重なると、2河川が同時に水位上昇する可能性も考えられる。そのため、出水時には、短時間での判断、対応を要する河川となっている。

現在、鬼怒川・小貝川には各4箇所の基準水位観測所が設置されており、それぞれに受け持つ水防警報区間が設定されている(図-2)。基準水位観測所では、避難勧告等の発令判断の目安となる水位をリアルタイムで観測しており、洪水時には、これら8箇所の観測所の水位を監視しながら、市町を含む関係機関に、氾濫注意情報などの洪水予報等を発信している。

## (2) 洪水対応時の課題

上記のとおり、下館河川事務所は、非常に長い管理区間を持ち、かつそれに掛かる市町数も非常に多い事務所となっているため、洪水時には、限られた職員で複数の市町と連絡を取ることが必要となる。そのため、短時間でポイントを絞った情報のやり取りを行う必要がある。

平成27年の関東・東北豪雨の際にも、自治体側における各種情報把握方法や、お伝えしていたはずの重要水防箇所への対応方法について、事前の周知徹底が不足していたことや、関連団体の情報を適切に入手するための方法が徹底されておらず、自治体・水防団の情報把握に時間を要し、更に情報を共有するまでに時間を要したこと

など、各種課題があったと当時の職員から聞いている。

## (3) 課題に対する方向性

実際の洪水時には、必要な情報を限られた時間の中で判断し、適切なタイミングで伝えていくことが重要となる。

- ・情報の受け手側となる市町においても、あらかじめ危険となる箇所の情報を把握頂き、その対応や対策についても平常時から整理しておくこと。
- ・洪水時の情報が、どのように収集・伝達されるのか、その経路を再確認すること。

以上が重要であると考え、下館河川事務所では、流域に掛かる関係市町全体と水防に関する情報を今まで以上に共有し、水防災の知識、意識についてレベルアップする各種取り組みを開始した。

## 3. レベルアップに向けた取り組み

全国の河川事務所では、本格的な出水期を迎える前に、水防に関する各種会議や首長との意見交換、現地で水防上重要な箇所を地域住民も含めて確認する共同点検等が、毎年実施されている。

今回は、これら取り組みの中でも、昨年度から下館河川事務所オリジナルとして新たに踏み込んだ、危機管理部局と土木部局の部長級職員を対象とした「出水期に係る対応等に関する連絡会」と、関係するすべての市町と実践した「ホットライン訓練」について紹介する。

### (1) 出水期に係る対応等に関する連絡会







写真2 ホットライン訓練（下妻市の例）

また、これら資料はすぐに取り出せるように、市町においても災害対応となる部屋に常備して頂くようお願いし、実際の洪水時には、双方が共通の資料を用いて、携帯電話等ですぐに必要な情報をお伝えする事が出来る体制を構築した。

同年8月の台風時には、これら資料が活用され、市町においても早い段階から下館河川事務所と連絡を取り、必要な情報を入手するなど、効果的な災害対策がなされる結果に繋がった。

## (2) ホットライン訓練

洪水時における情報伝達の一手段であるホットラインは、氾濫注意情報などの洪水予報等の連絡に加え、事務所長から市町村長へ直接電話にて河川の状況等を補足的にお伝えする緊急時の手段である。

下館河川事務所では、関係するすべての市町長との間で、実際に携帯電話を用いた情報伝達訓練を実施した（写真-2）。また、これに併せて関係市町の危機管理担当の部長、課長級職員とも、実務レベルの情報伝達訓練を実施し、より確実に情報伝達が行えるように工夫をした。

### a) 訓練の概要

訓練は、まず実際の洪水を想定して、洪水予報のFAXが下館河川事務所の防災対策室から送信されるところか

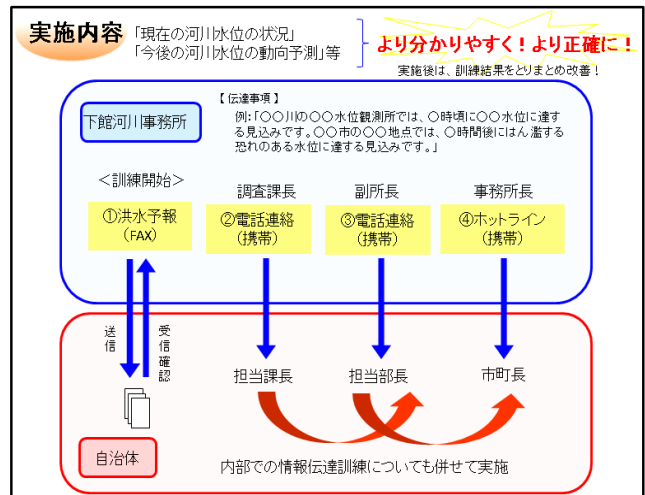


図-5 ホットライン訓練のイメージ

ら始まる。その後、市町からの受信確認の連絡を受け、事務所課長から市町の課長へ、事務所副所長から市町の部長へ、最後に下館河川事務所長から市町長へと携帯電話により情報伝達が行われる（図-5）。伝達する内容は、各者同じ内容とし、下記に一例を挙げる。

### I. 水位上昇の見込み

「〇〇川の〇〇水位観測所では、〇時頃に氾濫危険水位に到達する見込みです。」

### II. 近接市町の氾濫、氾濫到達時間の見込み

「〇時間後には〇〇川〇岸〇k（〇〇市〇〇地先）で堤防満杯となり、氾濫が発生する可能性があります。ここで氾濫が発生した場合には、計算上は〇〇市の中を通過して、今から約〇時間後に〇〇市に到達する恐れがあります。お渡ししている氾濫シミュレーションの〇〇川〇岸〇kをご覧ください、避難情報の参考にして下さい。」

### III. 当該市町の氾濫の見込み

「〇〇市内においては、市内で最初に氾濫の恐れがある箇所は、〇〇川〇岸〇k（〇〇地先）で、計算上は約〇時間後に氾濫が発生する可能性があります。お渡ししている氾濫シミュレーションの〇〇川〇岸〇kをご覧ください、避難情報の参考にして下さい。」

事務所防災対策室では、管内図や空中写真、市町のタイムラインやハザードマップ等の基礎資料を机に並べ、3(1) 出水期に係る対応等に関する連絡会で作成し、市町に提供した資料一式を確認しながら、想定シナリオの伝達を行った。市町においても、その情報を受けて、水防団による点検状況を報告頂いたり、避難指示の対応などについて検討頂いた。

### b) 訓練の成果

約15分間の訓練ではあったが、成果は予想以上のものであったと感じている。

各市町と訓練を重ねるうちに、事務所からは同じ情報を伝えているのに、市町によって対応の早さが大きく異なることに気が付いた。

対応が早い市町は、河川事務所からの情報を即座に理解し、河川の状況を把握した上で、市町なりの防災行動を報告する。一方、対応が遅い市町は、河川事務所からの情報を伝えた時点で、電話のやり取りが一時中断してしまい、資料の場所を確認するような事態となる。

その主たる原因は、事前準備がどれだけされていたかの違いであり、それは、訓練実施後の聞き取り調査で明らかになった。

下館河川事務所では、訓練を通して、気付いた点や改善すべき点等、市町にフリーで意見や感想を述べて頂いている。

対応が早かった市町からは、「事前に提供された連絡会の資料を用意していたため、それに基づいて状況を把握することが出来た。」「事前に作成していたタイムラインに基づき行動を確認することが出来た」などが主な意見として挙げられた。

それに対し、対応に時間を要した市町からは、「図面等の準備がない状態で訓練を開始してしまったため、伝達内容の理解に時間を要した。」「事前に河川事務所から提供されていた情報が、内部で周知されていなかった。」「災害対応時には、大きく印刷するなどして、皆で資料を共有したい。」などの意見が挙げられた。

その他、訓練の過程で、年度当初に市町と確認したはずの洪水対応用のFAX登録番号に間違いが判明したり、市町自身が登録したFAX番号を把握していなかったりなど、そもそも訓練以前に改善すべき点がいくつも発覚し、本番前に対応を取ることが出来た。

また、事務所内においても、情報の伝え方や話す速度などは、訓練の回数をこなす毎に向上し、「地点の情報を、河川の距離標や隣の市町の地先名で伝えられても瞬時に理解が出来ない。」「近くのランドマーク的な施設等を同時に伝えてもらうなどの配慮がほしい」など、市町からのご指摘を頂くことで、より実践的な対応が出来るようになった。

このホットライン訓練では、洪水対応をスムーズに行うためには、平常時からの備えが大変有効となり、事前にイメージをしておくことで、有事の際の行動に大きな差が現れることが分かった。また、連絡会で作成した“お役立ち資料”を活用し、同一の資料を確認しながら情報伝達を行うことが、迅速な情報伝達には非常に効果があることも検証出来た。更に、これらの結果について市町にも改めて認識をして頂き、出水期前の準備を進めてもらえたことが、この取り組みの最大の成果であったと考える。

この取り組みは、マスコミでも取り上げられ、テレビのニュースでも放映して頂くことが出来たことで、一般の方々の行政や災害対応への理解の促進、また水防災意識の向上の面において、効果があったと考えられる。

## 4. 取り組みの成果

国、市町双方で、洪水対応時の一連の流れを再確認し、いざというときの対応についてもホットライン訓練等を行い共有出来たことで、洪水時の情報がどのように収集・伝達されるかについて、改めて共有する事が出来た。また、その情報への対応や対策についても“お役立ち資料”の活用等により、短時間でポイントを絞った情報のやり取りが可能になり、当初よりも大きく課題解決に向けて前進した。更に、これら取り組みを通じて、あらゆるレベルでの国と市町との関係が非常に近くなったと感じており、このような平常時からの取り組みが、お互い顔の見える関係を築き上げ、それが緊急時の円滑なやり取りにも反映されることが示唆された。

## 5. 反省点と今年度の取り組みへの反映

昨年度、下館河川事務所では、平成27年9月の関東・東北豪雨を受け、「鬼怒川緊急対策プロジェクト」の1年目ということで、全国的にも注目をされる中、様々な新たな取り組みにも挑戦してきた。これまでに述べた取り組みもそれらの中の一事例である。

特に、ソフト対策では、出来る限り出水期前までに市町に情報を提供し、水防に関する知識やその情報の入手方法について、流域一体で周知徹底を図るべく、事務所内でも議論を繰り返してきた。

様々な意見を集約し、考えながら作り込んだものが3(1)で紹介した連絡会の資料であるが、限られた時間の中で作成したものであったため、連絡会での提示後に市町から指摘を受け修正をした箇所もいくつかある。

また、初めて作成し提示した換算水位縦断面図についても、事務所内でのチェックが間に合わず、いくつか誤った評価をしたまま提示をしてしまい、市町から質問を受けて間違いに気付くという場面もあった。

ただ、このような新たな取り組みを始めることで、新しく見えたこと、得られたことは非常に大きかったと実感している。市町担当者とのやり取りの中で、自分にはなかった市町の視点に気が付いたり、分かっているだろうと思い込んでいたことが、実は伝わっていなかったりなど、話をする中でお互いに刺激し合うことも多く、これら取り組みを通して市町担当者との信頼関係が生まれていった。お互い顔の見える関係を築いていくことが出来たため、相手の考えを理解することも早くなり、こちらの考えについても相手を理解した上でお伝えすることが出来るようになった。実際、コミュニケーションを通して自分自身の考え方も広がったと感じている。

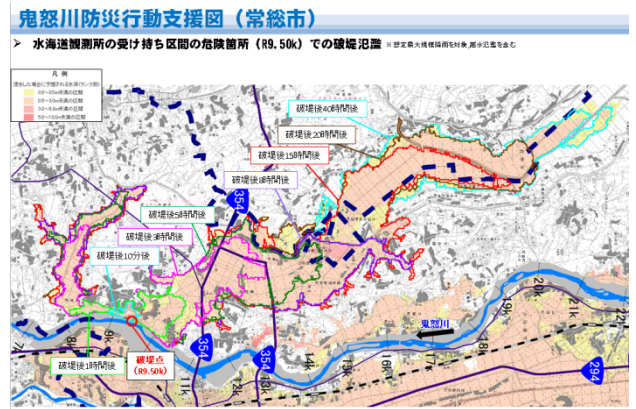


図-6 ブラッシュアップした防災行動支援図（常総市\_鬼怒川の例）  
 (左：危険箇所位置図 右：氾濫シミュレーション)

今年度も連絡会やホットライン訓練は既にも実施し、資料についてもブラッシュアップしている。昨年、市町から頂いていた意見については、出来る限りお答えする形で資料に反映し、事務所においても、昨年公表した洪水浸水想定区域図を反映したり、写真や表現出来ていなかった危険箇所の情報を追加したりと、明らかに情報量を増やし、課題となっていた部分も大きく改善を図った。

市町からも非常に分かりやすい等の言葉を頂き、今後も事務所と市町、双方が利用しやすく、必要とされる情報を提供していければと考える。そして、最終的には、一般の方にも分かりやすい資料、情報を提供出来るように努めていきたい（図-6）。

## 6. 今後の展開

水防災意識社会とは、氾濫が発生することを前提として、社会全体で常にこれに備える社会である。

昨年度は主に、関係機関や市町との連携を強化し、行政側の底上げに携わってきた。

しかし、水防災意識社会を成り立たせるためには、住民の防災意識の高揚と防災知識の向上が不可欠となる。

平成27年9月の関東・東北豪雨では、逃げ遅れにより多数の住民が孤立し、4,300人が救助される事態となってしまった。

堤防が整備され、治水安全度が上がると、人は逃げなくなる。ある市の担当者から聞いた話であるが、洪水時に避難勧告を出したが、実際に避難をした住民は2割以下であったという。地域が安全になることが、イコール洪水のリスクがゼロになる訳ではない。このことを再認識して頂く必要があると改めて感じた瞬間だった。

住民の意識は、簡単に変えられるものではない。行政側も根強く本気で向き合っていく必要がある。まずは水防災に関する正しい知識をお伝えし、災害はいつ起こっ

てもおかしくないということを改めて認識頂くことが大切である。そして、もし災害が起こった時には、自らの命は自らで守るという自助の考えを持って行動して頂くことが理想である。そこに共助や公助が重なって、地域全体で災害に立ち向かえる社会を実現していければと考える。

下館河川事務所においても、地域の方々に対して、現地説明会や防災教育、SNSによる情報発信等、様々な取り組みを行っている。その一つ一つの取り組みにも、それぞれ水防災を身近に感じてもらえるような工夫を凝らし、その広報戦略についても検討を重ねているところである。そして、昨年度途中からは、地域の方々も一体となって水防災に取り組むことを目的として「みんなでタイムラインプロジェクト」を立ち上げた。これは、住民一人ひとりがそれぞれの環境にあった逃げ方、避難行動をとりまとめるものであるが、現在、モデル地区での実施が完了したところである。今後は、流域全体にこの取り組みを広げられるように、更に市町との連携を強化して展開を図っていく予定である。

## 7. おわりに

昨年から一年余り、水防関係の仕事を担当させて頂き、自治体の皆様は元より、多くの関係者の方々と接する機会があった。中でも、担当者同士の意見交換や、情報交換は、仕事の考え方にも刺激を与え、結果的に考える機会を与えて頂くこととなり大変感謝している。

今後も引き続き、水防災意識を住民一人ひとりの生活の中に再び浸透させられるように、そして平成27年9月の関東・東北豪雨を風化させないように、自治体や県、関係する国の機関と一体となって意識改革に取り組んでいきたい。



# 『湯沢市 沖ノ沢地区』警戒・避難体制について

高橋 弘樹<sup>1</sup>・菊池 秀樹<sup>2</sup>・木村 圭佑<sup>3</sup>

<sup>1</sup>秋田県雄勝地域振興局建設部 副主幹 高橋 弘樹 (〒012-0857 秋田県湯沢市千石町二丁目1番10号)

<sup>2</sup>秋田県雄勝地域振興局建設部 副主幹 菊池 秀樹 (〒012-0857 秋田県湯沢市千石町二丁目1番10号)

<sup>3</sup>秋田県北秋田地域振興局建設部 技師 木村 圭佑 (〒018-3393 秋田県北秋田市鷹巣字東中岱76番1号) .

湯沢市皆瀬沖ノ沢地区(13世帯48名)住民から沖ノ沢川(溪流長L=1.5km、流域面積A=0.17km<sup>2</sup>)において濁水の情報提供があり、2015年4月に現地調査を行ったところ、集落直上の砂防えん堤上流部において山腹崩壊が確認された。既に砂防えん堤は満砂となっており、土石流発生の可能性が高い状況であった。ただちに住民への注意喚起、警戒・避難体制の構築、えん堤上流の除石工事等を実施した。2015年9月には豪雨による住民全員の避難も行われたが、平成28年7月、堆砂容量拡張工事の完了により、沖ノ沢地区に特化した警戒・避難体制を解除し、通常の警戒・避難体制に移行している。今回は、警戒・避難体制を主に報告するものである。

キーワード：防災、土砂災害、避難、共助

## 1. 経緯

### (1) 情報提供、現地確認

2015年4月28日、地区住民から秋田県雄勝地域振興局建設部(以下：雄勝建設部)へ、沖ノ沢川の水が降雨時に濁るという情報提供に基づき、雄勝建設部、湯沢市並びに地区住民による現地調査を実施した。この調査により、砂防えん堤の満砂状態、えん堤上流域での山腹崩壊(幅20m、長さ30m、深さ3m)(図2、3)を確認し、大雨時に土石流発生の可能性が高いと判断した。



図2—山腹崩壊全景(ドローンによる空撮)



図1—位置図



図3—上流域土砂堆積状況

**(2) 警戒・避難体制の強化、対策**

2015年4月28日の調査結果を受け、市では警戒・避難体制の構築に着手し、雄勝建設部では流域調査及び対策工の検討を行った。

2015年5月25日に市と雄勝建設部合同で、地区住民13世帯48名を対象とした説明会を開催し、市からは沖ノ沢地区に特化した警戒・避難体制について、雄勝建設部からはえん堤上流部の除石等の緊急対策について説明し、了承を得た。

2015年6月1日から10日にかけて、応急対策として集落山側には、住宅への土石流の直撃を防ぐための大型土のうを設置し、集落内の流路工断面確保のための土砂除去、えん堤水通し部には土石流発生を知らせる土石流センサー(図4)、沖ノ沢集落内には雨量計及び警報装置(回転灯、サイレン等)を設置した。集落内の雨量計により得られた雨量情報はメールで自動配信するとともに、インターネットで地区住民も閲覧できるようにした。

また、雄勝建設部では大雨気報発令時に、局内での情報収集や関係各位へ連絡をする情報班と、沖ノ沢地区へと向かい、前兆現象の確認、地区代表や消防団との情報交換、地元住民からの要請があった場合に現地支援を行う現地班の二班を編成し、異常時にも対応出来るよう体制をとった。



図4-土石流センサーの設置

市からは沖ノ沢地区独自の避難判断基準(図5)が示され、自主防災組織の早期立ち上げ、緊急連絡網の作成、避難マップの作成の要請があった。

時間雨量20mm以上、降り始めからの累積雨量が80mmを超えた場合、また土石流の前兆現象を確認した場合に自主避難の必要性があることの説明があった。

この市からの要請をもとに沖ノ沢住民自らで自主防災組織を立ち上げ、何度も住民間での話し合いが行われた。

そこでは沖ノ沢地区の代表を中心に避難マップ(図6)を検討、作成した。その避難マップには、沖ノ沢地区住民全員の名簿、昼と夜に在宅している人及び人数、消防団員が誰か、消防団員の誘導方法、緊急連絡先、援護者がどこにいて誰が支援するのか、そして土石流警報装置が作動した場合の対応について記載されている。それを雄勝建設部が清書し、沖ノ沢の全戸へ配布し、日ごろから避難手順について確認できるようにした。



図6-避難マップ

## 避難判断基準

- ・ **避難準備情報発令**  
時間雨量**20mm**もしくは**累計80mm**
- ・ **避難勧告発令**  
時間雨量**50mm**もしくは**累計100mm**

図5-避難判断基準

2015年7月5日、沖ノ沢住民48名中、不在者6名を除く42名全員が参加した地区住民主催の避難訓練(図7)を実施し、緊急時の避難場所・経路を確認した。

避難訓練では、午前8時のサイレンを始めに避難準備を行い、避難勧告のサイレンによる避難開始、沖ノ沢公民館へは午前8時20分に避難完了した。

雄勝建設部や市は、避難状況を見守り、訓練後の反省会で意見を聞きアドバイスした。

- ①避難準備の段階で、非常用袋を準備し、特に常用薬は忘れないこと。
- ②避難準備のサイレンで避難を開始した人もいたことから、避難準備と避難勧告とのサイレンの聞き分けをす



ること。

③避難訓練時は晴天だったことから、実際の避難時は大雨の場合であるため、実際の避難時をあわてずに避難することなどが挙げられた。

なお、住民からサイレンが聞き取りにくいとの話があり、ボリュームを調整した。



図7—避難訓練状況

2015年7月23日、えん堤上流の除石（堆積土除去）（図9、10）を完了し安全性は増したが、不安定土砂量の容量を確保出来なかったため、警戒避難体制解除に至らなかった。

### (3) 豪雨による避難

2015年9月10日から11日にかけての豪雨により、地区内に設置した雨量計で累加雨量100mm（最終120mm）を記録した。このことから、避難情報等の発令基準に基づき、11日午前3：00湯沢市が避難勧告を発令した。

2015年9月11日

- 午前0：50 避難準備情報発令 累加雨量80mm超
- 午前2：50 避難勧告発令基準 累加雨量100mm超
- 午前3：00 避難勧告発令
- 午前3：22 避難開始（避難誘導）
- 午前3：50 一時避難場所である公民館に集合完了、マイクロバス2台で約5.8km離れた最終避難場所（湯沢市皆瀬支所）へと移動開始
- 午前4：30 最終避難場所である湯沢市皆瀬支所へと移動完了
- 午前8：05 避難勧告解除

住民48名のうち、消防団員3名、当日不在者1名を除いた44名は避難場所に無事避難を完了した。

この避難の際、常用薬等が入った非常用袋を持参した。

幸い、この豪雨による新たな崩壊はなく、えん堤部への土砂流出はわずかなものであった。



図8—豪雨の中で非常用袋を持参しての避難

### (4) 警戒・避難体制の解除

2016年7月5日、地山掘削による堆砂容量拡張工事の完了により、不安定土砂分の容量が確保されたことから、湯沢市は、409日間続いた沖ノ沢地区に特化した警戒・避難体制を解除した。

その後、雄勝建設部において、土石流センサー、雨量計及び警報装置を撤去し、月1回の定期巡視と融雪期や大雨時の現地確認を実施している。



図9—除石着工前



図10—除石完了



## 2.住民の危機意識の変化

今回、沖ノ沢住民は土石流の危険性が確認されたことにより、市の要請により住民自らで自主防災組織を立ち上げ、自主的な防災活動を行うこととなった。

防災活動の一環で、地区住民主催の避難訓練を行い、緊急時の避難体制を確認した。また、自主防災組織を核とした情報網の整備を図り、伝達の強化にも努めた。実際の避難は、未明の豪雨にも関わらず訓練で気付いた反省点を活かして、適切な避難準備や避難行動を行った。また、沖ノ沢地区には3名の避難行動要支援者がいたが、避難マップに記載の通り、地区の人々で助け合い、滞りなく避難が完了した。

異常時に不慣れで危機意識の薄かった沖ノ沢住民が、今回の避難を円滑に行うため、土砂災害を身近なものとして捉え、日ごろから住民同士で話すことで、防災意識を地区内で確認しあい、行政と連携することを通して、防災への意識改革を行うことが出来た。



図11-住民同士での話し合い

## 3. 今後の整備方針

当該えん堤は1975年完成であり、現行の技術基準では安定性を確保できていないことから、今後、堤高の嵩上げや堤体を増厚、流木止めの新設などのえん堤の補強を行い、安定性を確保することとしている。

また、えん堤上流の堆砂状況や崩壊箇所の変状について、月1回の定期巡視と融雪期や大雨時の現地確認を引き続き行っていき、堆砂量が基準に達した場合には除石を行うこととしている。

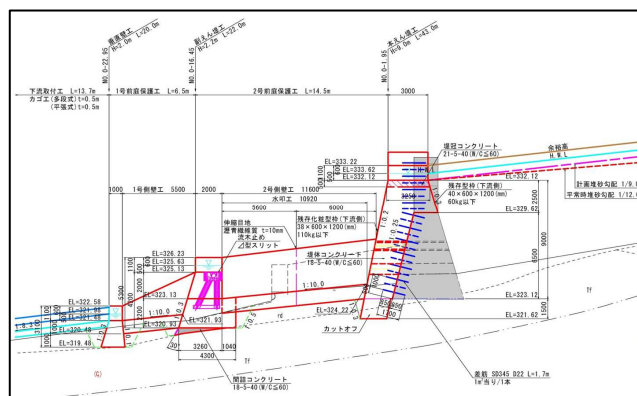


図12-砂防えん堤計画一般図（側面図）

## 4. まとめ

今回、沖ノ沢地区において警戒・避難体制を構築するにあたり、何度も地区住民との話し合いが行われた（図11）。湯沢市や県は側面から支援する形をとり、地区住民が自ら自主防災組織の立ち上げ、緊急連絡網の作成、避難マップの作成、避難訓練等を行った。

実際の豪雨時に避難勧告が発令された際、過去の経験から避難に対して疑問をもつ人もいたが、警戒・避難体制を構築する場において、住民間で話し合いを重ねていたことにより、最終的には避難の必要性を理解し、地区住民全員が避難した。

このことは、地区住民の危機意識が高まり、自助だけでなく、相互に助け合うこと、つまり共助の意識が高まったことと思われる。

昨今、豪雨による被害が続いている。秋田県内も7月と8月の豪雨により、多くの住民が被害を受けた。少子高齢化が進み、過疎化が著しい秋田県を始めとする山間の地方部において、同地区のように自助・共助の意識が高まり、昨今国内で頻発している大規模災害に遭遇しても、尊い命が奪われることが無くなることを願う。



図13-沖ノ沢地区

# 津波防災地域づくりに資する 砂丘の減災効果を確保するための要件の検討

浜口 耕平<sup>1</sup>・加藤 史訓<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

津波に対して減災効果を有すると考えられる砂丘等を津波防災地域づくりに活用する方法を整理した。さらに、樹木の減勢効果及び耐侵食効果を考慮した地形変化計算を実施し、津波に対する砂丘の減災効果の確保に必要な要件を検討した結果、津波越流時に砂丘が減災効果を発揮するには、予想される津波に対し砂丘の幅を十分に確保すること、また予想される津波に対して十分な幅がない砂丘については、植生の適切な管理により耐侵食性を確保することが重要であることが明らかになった。

キーワード 津波防災, 砂丘, 樹林, 数値計算, 土砂移動

## 1. はじめに

津波防災地域づくりに関する法律に基づき、最大クラスの津波が来襲した場合の浸水想定を踏まえた「津波防災地域づくりを総合的に推進するための計画」（以下、推進計画）の作成が沿岸の各市町村において進められている。推進計画の作成に当たって参考にできる「津波防災地域づくり推進計画作成ガイドライン」<sup>1)</sup>では、実態調査から現状・問題点、課題の整理、基本方針・目標の検討、目標の実現のための施策の検討、計画案の作成に至る計画の検討手順が整理されている。この中の施策の検討においては、ハード・ソフト施策の総合的な組み合わせを検討し、必要に応じて津波防護施設の新設等のハード対策を検討する必要がある。

新たなハード対策を進めることが必要な地域でも、既存の地物の中には津波に対して減災効果を有するものもある。たとえば、海岸の砂丘やその上の樹林は津波を減勢することから、防災を目的とした社会基盤施設と同様に、背後地の被害を軽減する効果を発揮することもある。しかし、社会基盤施設と同様に効果を期待するのであれば、減災効果の発揮限界を明らかにした上で津波防災への活用を検討するとともに、減災効果を有する砂丘等の地物が適切に管理されていなければならない。最大クラスの津波も含めて背後地に被害をもたらす規模の津波は、数十年から百数年に一度程度より低い頻度なので、砂丘等の地物を後世へ継承するには継続的な取り組みが必要となる。

以上のことを踏まえ、社会基盤施設として捉えることができる、自然に形成された地物や、長年に亘り存在し、

地域に溶け込んでいる人工的な地物を「自然・地域インフラ」として捉え、津波に対して減災効果を有すると考えられる砂丘とその上の樹林、及び旧堤・二線堤等の盛土構造物を津波防災地域づくりに活用するための方法を検討した。さらに、樹木の減勢効果及び耐侵食効果を考慮した地形変化計算を実施し、津波に対する砂丘の減災効果を確保するための要件を検討した。

なお、津波防災地域づくりへの砂丘等の活用方法、砂丘の減災効果を確保するための要件の詳細については国総研資料第986号<sup>6)</sup>、浜口ら<sup>7)</sup>を参照されたい。

## 2. 津波防災地域づくりへの砂丘等の活用方法

### (1) 砂丘等の活用にあたっての考え方と留意点

津波に対して砂丘等に期待される減災効果は、以下の2点である。

一つ目は、津波を減勢し、被害を軽減するあるいは避難時間を確保する効果である(図-1)。砂丘等は、その高さにより津波が陸上に遡上することを阻み、避難時間を確保する役割を果たす。また、防潮林等の海岸林は、津波が通過する際に抵抗となり、津波を減勢させることが知られている<sup>2)</sup>。一方、津波の外力が大きい場合、砂丘が侵食されたり、樹木が倒伏したりするなど、減災効果の発揮限界があることにも留意が必要である。

二つ目は、津波からの避難場所となり、被害を軽減する効果である(図-2)。地域にある高台は、津波からの避難場所となる。史跡として「命山」が残っている例もあり、近年も防災機能を持つ公園などとして新たに整備されている。近くに高台がない場合は、高いビルや盛土

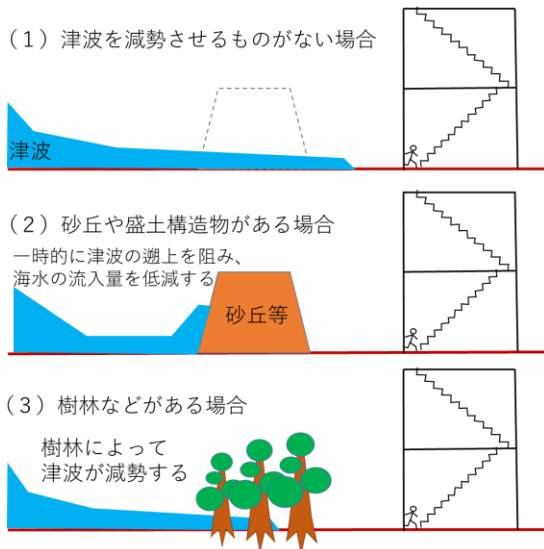


図-1 津波を減勢し、被害を軽減するあるいは避難時間を確保する効果の例

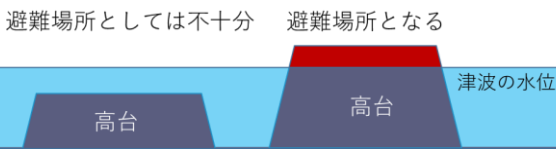


図-2 津波からの避難場所となり、被害を軽減する効果

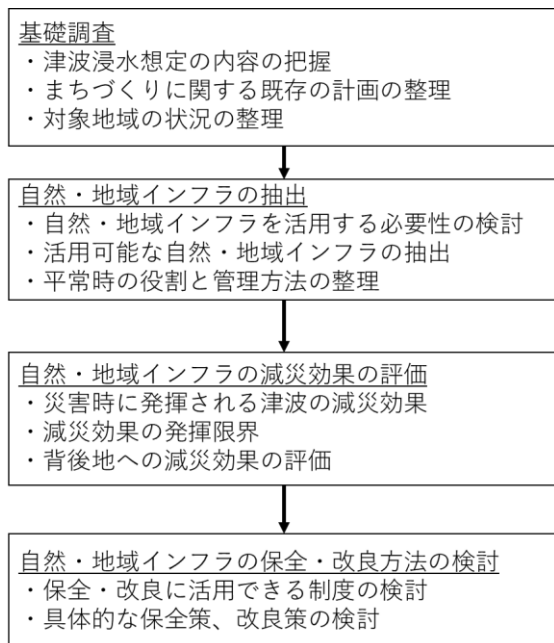


図-3 津波の減勢効果を有する砂丘等の保全・改良の検討方法

構造物なども避難場所となりうる。なお、避難場所となるためには来襲した津波の高さよりも高い場所でなければならない。

本研究では一つ目の効果に着目し、その効果の保全・改良について検討する。

## (2) 自然・地域インフラの保全・改良の検討方法

自然・地域インフラのうち、津波の減勢効果を有する

砂丘等の保全・改良については、津波浸水シミュレーションを用いた検討が有効である。その検討の流れは図-3のように整理される。

基礎調査では、対象地域の津波浸水想定や都市計画など、津波防災地域づくりに関わる対象地域の状況を整理する。

次に、基礎調査の結果をふまえて砂丘等を活用する必要性を検討し、活用可能な砂丘等を抽出し、それらの平常時の役割と管理方法を整理する。想定される浸水範囲、浸水深、地域の人口や資産の集積状況等から、砂丘等の活用で津波減災を図る必要があるか否かをまず判断する。その必要性が認められる地域において、津波浸水想定浸水範囲と地形データを用いて、津波の減勢効果がありそうな構造物や樹林帯などの地物を砂丘等の候補として抽出する。

次に、津波の減勢による背後地への減災効果を評価するために、津波浸水シミュレーションを実施する。また、自然・地域インフラの改良策を検討する際には、砂丘等の条件を変えて津波浸水シミュレーションを実施し、改良前の減災効果との比較を行う。

最後に、砂丘等の保全・改良に活用できる制度を検討し、具体的な保全策、改良策の立案を行う。なお、保全とは対象とする砂丘等が有する津波の減勢効果を維持すること、改良とは津波の減勢効果をさらに高めることである。

砂丘等の保全・改良策には、①津波の越流を防ぐ、あるいは遅らせる策（例：砂丘等の高さを上げる『かさ上げ』）、②津波の越流による減災効果の低下を防ぐ策（例：砂丘の侵食を遅らせるための植栽管理や、法面や法尻部分の被覆）、③地震など津波以外の外力に対して津波の減災効果を確保する策（例：地震動による沈下を防ぐ液状化対策）がある。①については、砂丘等を津波防護施設に指定して海岸堤防と組み合わせることで、津波による被害軽減を早期に達成できる可能性がある。②については、保安林や海岸保全施設等への指定、文化財保護法に基づく史跡名勝天然記念物の指定、自然環境保護法や国立公園などの自然公園法での指定地域などが活用できる可能性がある。③については、海岸部の保安林の基盤嵩上げ等にあわせて実施されている事例がある。いずれも、制度に付随する制約や予算措置も含めて検討する必要がある。

## 3. 砂丘が有する減災効果の確保に必要な要件

### (1) 検討の目的

土地利用の変化などにより、砂丘の掘削や海岸林の伐採などの開発が行われることで、津波に対する砂丘の減災効果が損なわれるおそれがある。防潮林については減災効果を発揮するための条件を検討した論文が複数ある





図4 対象測線の位置

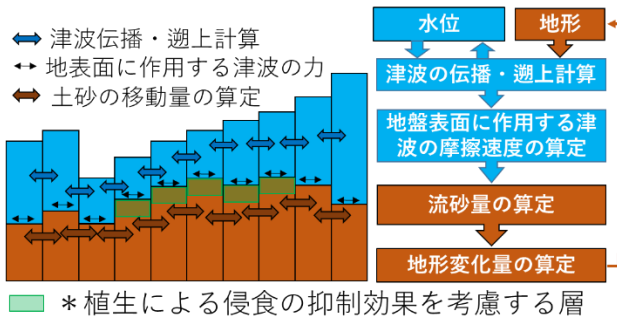


図5 津波による地形変化の計算方法

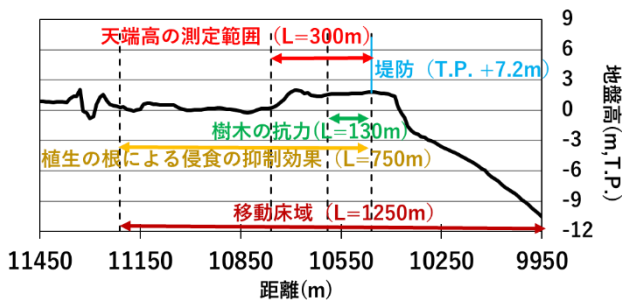
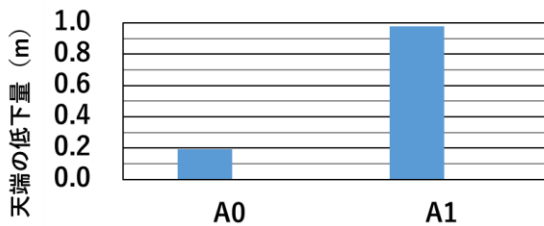


図6 移動床の計算範囲と植生を考慮した範囲

(1) 地形の違いによる結果



(2)  $\alpha$  の違いによる結果 (地形はA0)

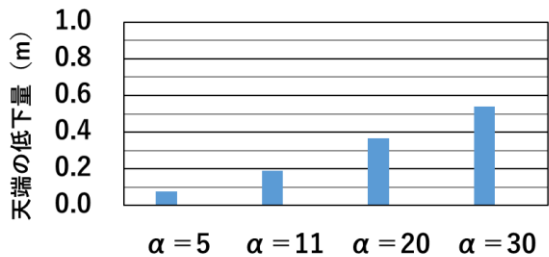


図7 砂丘の天端の低下量

(たとえば首藤<sup>2)</sup>)。しかし、津波越流時に砂丘の減災効果が発揮される要件を整理した研究はない。そこで、砂丘の減災効果の指標として砂丘の天端高(頂部の高さ)を用いて、樹林の減勢効果及び耐侵食効果を考慮した地形変化計算を実施し、津波に対する砂丘の減災効果の確保に必要な砂丘形状や植生条件を検討した。

(2) 使用した数値モデルと計算条件

本研究では宮城県名取市付近の沿岸部において岸沖方向に設定した測線(図-4)を対象として検討を行った。

津波の伝播・遡上計算には、「津波浸水想定の設定の手引き」<sup>8)</sup>に従い、非線形長波理論を基礎方程式とする計算モデルを用いた。計算領域の沖側境界では、東北地方太平洋沖地震津波の断層モデル(東北大モデルver.1.2)<sup>9)</sup>を用いた広域的な平面二次元の津波伝播計算で得られた、水深30mの地点の波形を入力した。なお、海岸堤防は津波越流直後に破堤することとした。越流水深は最大6.9mであった。

植生に関する条件として、運動方程式において樹林による減衰を考慮するとともに、流体力のモーメントによる樹林の倒伏を考慮した。

津波による地形変化は、津波の伝播・遡上計算で得られる地表面に作用する津波のせん断力を用いて算定される流砂量の収支から求められる(図-5)。その際、植生が分布する範囲では、植生の根により地表付近のせん断力が低下して地盤の侵食が軽減される耐侵食効果を考慮した。また、流砂量の算定には、シールズ数以外に無次元粒径と無次元沈降速度を用いて浮遊砂の巻き上げ量を計算するモデル<sup>4)</sup>を用いた。

樹木等の植生による侵食の抑制効果を考慮する範囲では、植生の根は地盤の表層にのみ存在すると考えられることから、根の侵食抑制効果が期待できる深さ(侵食限界)まではその効果を考慮して侵食深を計算した。宇多ら<sup>10)</sup>の方法に従って、摩擦速度(せん断力を速度の次元で表したもの)と侵食の抑制効果を表す指標 $\alpha$ (0に近いほど耐侵食性が大きい)を含む式(1)によって時間あたりの侵食深を算出し、これに計算格子間隔を乗じた土砂量を浮遊砂の巻き上げ量とした。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\alpha u_*}{\ln 10} \exp\left(-\frac{\ln 10}{\alpha u_*} z\right) \quad (1)$$

ここに、 $z$ は侵食深(cm)、 $t$ は時間(分)、 $u_*$ は摩擦速度(m/s)、 $\alpha$ は植生の耐侵食性を表す定数である。侵食限界に達した後は、侵食の抑制効果を考慮しない領域と同様に流砂量式を適用して侵食深を計算した。

現況地形(A0)における移動床の計算範囲と、樹木の抗力、植生による侵食の抑制効果を考慮する範囲を図-6に示す。

(3) 計算ケース

侵食への砂丘形状の影響を調べるため、砂丘周辺の地

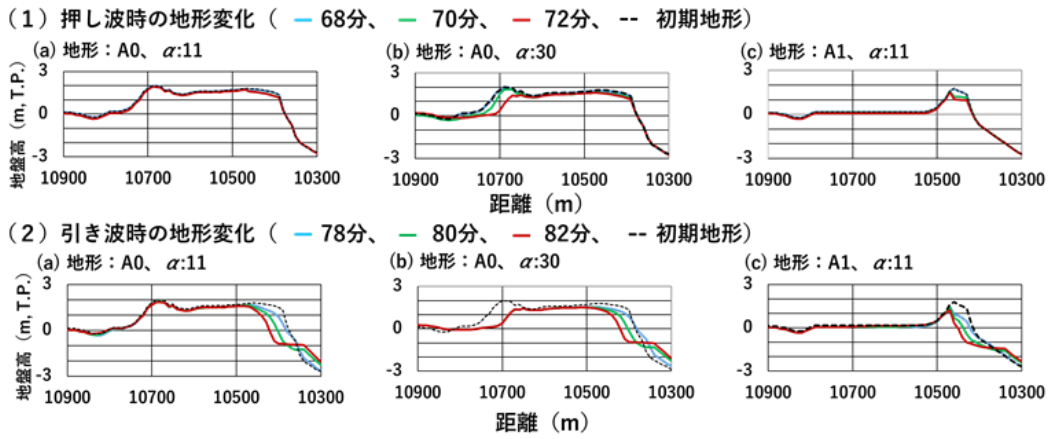


図-8 各ケースの地形変化 (図の右側が海)

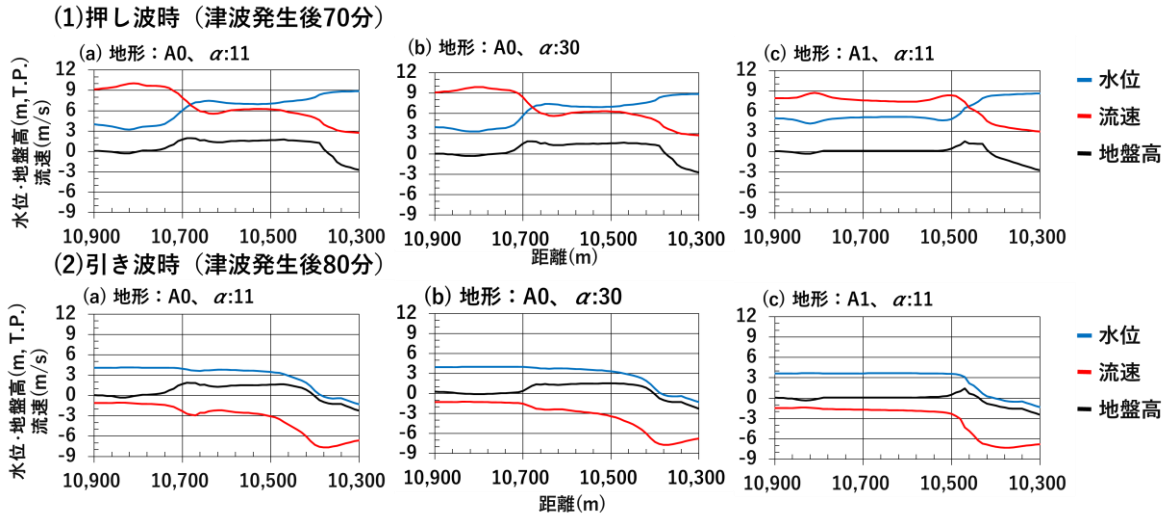


図-9 押し波時 (津波発生後 70 分) と引き波時 (同 80 分) の水位と流速. 流速の符号は、正 (負) が岸向き (沖向き). (図の右側が海)

形を現況地形A0 の他、砂丘の天端幅を40mに縮め、侵食に対して厳しい条件としたA1を設定した。

また、地盤表層の根量密度と関係する $\alpha$ は植生の管理状況にも依存することから、管理状況による侵食への影響を調べるため、A0 の地形において、原野ら<sup>11)</sup>を参考として、一般的な海岸林の条件 ( $\alpha=11$ ) のほか、より良い条件( $\alpha=5$ )と悪い条件( $\alpha=20, 30$ )を設定した。

#### (4) 砂丘の地形変化の計算結果

砂丘の減災効果を評価する指標として、砂丘の天端高の低下量を調べた (図-7)。なお、本研究では、第一波 (砂丘において第一波の引き波が終わる地震発生から87分後まで) に着目した。

砂丘形状を変えた計算において、砂丘の幅を狭くしたA1 ではA0 と比べて大きく天端高の低下が見られた。

(図-7(1))

$\alpha$  を変えた計算では、 $\alpha$ による天端高の低下量の違いが顕著に見られた (図-7(2))。天端高の低下量は、現地状況に近いと考えられる条件 ( $\alpha=11$ ) では0.19m、最も侵食されやすい条件 ( $\alpha=30$ ) では0.54 m、侵食されに

くい条件 ( $\alpha=5$ ) では0.08mであった。

#### (5) 砂丘の侵食過程の把握

砂丘の侵食過程を把握するために、押し波時 (68分, 70分, 72分) と引き波時 (78分, 80分, 82分) の地形の重ね合わせ図を作成した (図-8)。A0地形で $\alpha=11$  のケースでは、引き波の際に、表法面～表法肩にかけて侵食が進み、砂丘中央部へ侵食が進行する様子が確認できた (図-8(2)(a))。このとき表法肩では水深が小さく、大きな流速の沖向きの流れが生じており (図-9(2)(a))、侵食が進行したと考えられる。

砂丘の天端高が低下したA1では、押し波時において表法面～天端が侵食された (図-8(1)(c))。押し波時には、水位の低下及び流速の増加が、A0では砂丘の表法肩付近と裏法肩付近で段階的に生じるのに対し、A1では砂丘全体で生じている (図-9(1)(c))。A1の流速は砂丘海側から砂丘陸側までの狭い範囲で約3m/sから約9m/sに急増しており、流れが砂丘全体において加速しているA1では同様の現象は引き波時の表法肩付近にも見られた (図-9(2)(c))。これらのことから、A1 では津波の規模

に対して砂丘の幅が狭いため、押し波時、引き波時とも、砂丘全体において流れが加速し、法肩付近で発生する侵食が砂丘全体に及んだため、天端高の低下量が大きかったと考えられる。

また、 $\alpha=30$  のケースでは、押し波時において裏法面～裏法肩から砂丘中央部へ侵食が進行する様子が明瞭に現れた (図-8(1)(b))。このとき、裏法面では流速が大きくなっていったことから (図-9(1)(b))、砂丘の侵食は、この高流速に対して地盤の耐侵食性が十分ではなかったため進行したと考えられる。

#### (6) 砂丘が減災効果を確保するために必要な要件

堤防前面部 (距離 10,460m) における砂丘上の越流水深が 6.9 m、越流時間 (第一波のみ) が 19.5 分となる場合、砂丘の天端幅が 300 m(A0) であれば砂丘の天端中央部の侵食は少ないが、天端幅 40 m(A1) では天端全体が侵食され、天端高が著しく低下した。このことから、砂丘の減災効果を確保するためには、津波による侵食を予測して、砂丘の幅を一定以上確保することが重要と示唆された。なお、必要な砂丘の幅は、越流水深と越流時間によって変わるため、それらの影響を考慮できる地形変化計算を行うことで算定することができる。

また、図-7(2)のように、十分な砂丘幅がある場合でも  $\alpha$  により天端の侵食量が大きく変わることが示された。予想される津波に対して十分な幅がない砂丘については、砂丘の植生条件により天端高の低下がより進行しやすくなると考えられることから、植生の適切な管理により耐侵食性を確保することが有効と考えられる。なお、砂丘の許容変化量については個別の地先で検討する必要がある。

## 4. おわりに

津波に対して減災効果を有すると考えられる砂丘等を対象として津波防災地域づくりに活用するための方法を整理した。さらに、樹木の減勢効果及び耐侵食効果を考慮した地形変化計算を実施し、津波に対する砂丘の減災効果の確保に必要な要件を検討した。本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

・津波に対する減勢効果に着目して、砂丘等を津波防災地域づくりに活用するための検討は、基礎調査、減災効果を有すると考えられる砂丘等の抽出、それらの減災効果の評価、保全・改良方法の検討の順に進めることができる。

・津波越流時に砂丘の法肩～法面にかけて侵食が進むことから、砂丘が減災効果を発揮するには、予想される津波に対し、砂丘の幅を十分に確保することが重要と示唆された。

・予想される津波に対して十分な幅がない砂丘について

は、砂丘の侵食を抑制できるように植生の適切な管理により耐侵食性を確保することが有効と考えられた。

本研究の成果は、国総研資料第986号にまとめたほか、2017年9月7日に「津波防災への「自然・地域インフラ」の活用に関するシンポジウム」を開催して普及に努めている。津波防災地域づくりのさらなる推進のため都道府県等に対する技術支援を今後も行っていく。

謝辞：地形変化計算の実施にあたり、東北大学災害科学国際研究所の山下啓助教にご指導いただいた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局参事官 (社会資本整備) : 津波防災地域づくり推進計画作成ガイドライン (平成 28 年版), 41p, 2016.
- 2) 首藤伸夫: 防潮林の津波に対する効果と限界, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 465-469, 1985.
- 3) 原田賢治, 河田恵昭: 津波減衰効果を目的とした海岸林活用条件の検討, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 276-280, 2005.
- 4) 池野正明, 吉井匠, 松山昌史, 藤井直樹: 津波実験に基づく浮遊砂巻上量の算定と巻上量式の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.506-510, 2009.
- 5) 山下啓, 菅原大助, 高橋智幸, 今村文彦, 齋藤友一, 今任嘉幸, 甲斐恭, 上原均, 加藤季広, 中田一人, 坂良太郎, 西川朝雄: 岩手県陸前高田市における 2011 年東北地方太平洋沖地震津波による大規模土砂移動の再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I-499-I-504, 2015.
- 6) 加藤史訓, 原野崇, 浜口耕平: 津波防災地域づくりに関する自然・地域インフラの活用に関する技術資料, 国総研資料, 第 986 号, 2017, *in press*.
- 7) 浜口耕平, 原野崇, 加藤史訓, 二階堂竜司, 五十嵐雄介: 津波に対する砂丘の減災効果の確保に必要な砂丘形状及び植生条件の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, 2017, *in press*.
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局海岸室, 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室: 津波浸水想定 の 設 定 の 手 引 き Ver.2.00 (オンライン), [http://www.mlit.go.jp/river/shishin\\_guideline/bousai/saigai/tsunami/shinsui\\_settei.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/bousai/saigai/tsunami/shinsui_settei.pdf), 2012, 参照 2017-05-11.
- 9) 今村文彦, 越村俊一, 馬淵幸雄, 大家隆行, 岡田清宏: 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル (version1.2) (オンライン), [http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku\\_2011/modeled/drc\\_ver1.2.pdf](http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/modeled/drc_ver1.2.pdf), 参照 2017-05-11.
- 10) 宇多高明, 望月達也, 藤田光一, 平林桂, 佐々木克也, 服部敦, 藤井政人, 深谷渉, 平舘治: 洪水流を受けた時の多自然型河岸防衛工・粘性土・植生の挙動一流水に対する安定性・耐侵食性を判断するために, 土木研究所資料, 第 3489 号, pp.97-214, 1997.
- 11) 原野崇, 浜口耕平, 渡邊国広, 諏訪義雄, 伊藤幸義, 細谷治夫: 現地の樹木等を含む地盤供試体を用いた水理実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), vol.72, No.2, pp.I-1687-I-1692, 2016.



# 渡良瀬川における堤防植生管理手法の検討

中濱 匡

関東地方整備局 渡良瀬川河川事務所 管理課 (〒326-0822 栃木県足利市田中町661-3)

現在行っている年2回の堤防除草では、築堤時に植栽したシバが減退し、外来植物が侵入し、堤防の弱体化が進み、出水期中の堤防損傷等の発見が遅れる等、堤防維持管理に支障を来している。更に、除草に必要な維持管理費が増加する中、コスト縮減も喫緊の課題となっている。

本稿は、その課題を解決するため、近年の農薬取締法改正により安全で効果のある「植物成長調整剤」に着目し、刈取りに代わる効率的かつ効果的な堤防植生管理手法を検討する。

キーワード 堤防植生管理、植物成長調整剤、安全性、現地実証実験、コスト縮減、地域連携

## 1. はじめに

河川堤防の維持管理は、堤防点検等による状態把握が行われており、そのための環境整備として、年2回（出水期前・台風期）を基本とした除草が実施されている<sup>1)</sup>。しかし、年2回の除草では、築堤時に植栽されたシバが衰退し、セイヨウカラシナ等の外来植物の侵入・繁茂等の影響により堤体の弱体化や出水期間中における河川巡視等への支障等の様々な問題が引き起こされている。

このため、堤体の耐侵食性の確保及び堤体の状態を把握しやすい草丈の維持等の堤防植生に求められる機能を保持することを目的に、堤防管理上望ましい植生の維持・遷移等を行うための堤防植生管理手法を検討することが必要となっている。

本稿は、上記の問題を解決する堤防植生管理手法を検討するため、近年の農薬取締法改正により安全で効果のある「植物成長調整剤」に着目し、植物成長調整剤を用いた堤防植生管理に関する現地実証実験を実施し、コスト縮減も踏まえた効果検証を行っている事例を報告する。

## 2. 堤防植生に求められる機能

### (1) 堤防植生とは

堤防植生とは、「堤防法面の表面を覆う植生」を示す。土堤による新堤防（嵩上げ、拡幅等補強等を含む）の築造後の法面保護には、通常ノシバが用いられる。

ノシバは、①国内全域において、根の活着が早く、健

全に生育すること、②入手及び施工上の取り扱いが容易であること、③堤防植生に求められる機能（2)参照）に優れていることなどから、堤防管理上望ましい植生である。

### (2) 堤防植生で求められる機能

堤防植生に求められる機能としては、a)堤体の耐侵食性の確保、b)堤体の状態を把握しやすい草丈の維持などが挙げられる。

#### a) 堤体の耐侵食性の確保

土で構成された堤体を流水や雨水等による侵食から保護するため、根張りが良く、緊縛力の高い根系を有する耐侵食性の高い植生で覆うことが求められる。

#### b) 堤体の状態を把握しやすい草丈の維持

堤防点検及び河川巡視等の状態把握では、堤体の変状を発見しやすい草丈を維持できる植生で覆うことが求められる。

状態を把握しやすい草丈については、堤防点検の環境整備として位置づけられている年2回（出水期前・台風期）の除草において、草の刈取り高10 cm以下での施工が定められている<sup>2)</sup>。

## 3. 渡良瀬川における堤防植生の現状と課題

### (1) 堤防植生の現状

堤防植生は、その優占する種によって5つの堤防植生タイプ（シバ、チガヤ、外来牧草、広葉、オギ・ススキ）に分類することができる。

この分類を基に、渡良瀬川河川事務所管内における堤防植生の現状を把握するため、平成23年秋季と平成24年春季に、堤防植生タイプ区分調査を実施した。

その結果、シバタイプが約20%、チガヤタイプ及び外来牧草タイプがそれぞれ約40%を占めていた(図-1)。また、外来牧草タイプのうち、堤防維持管理上の支障となるセイヨウカラシナ(セイヨウアブラナ含む)が36.7%確認された。

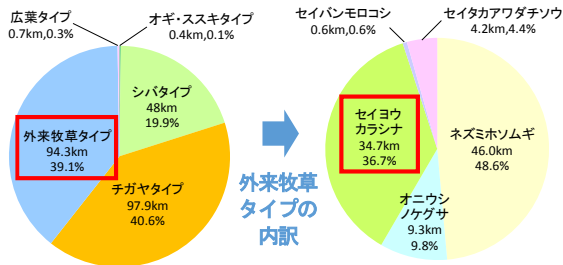


図-1 渡良瀬川管内の堤防植生タイプの現状(延長割合)

ここで、本稿で用いる主な堤防植生タイプ「シバ」、 「チガヤ」、 「外来牧草」の特徴を以下に示す。

#### a) 「シバ」

築堤時に植栽されたシバが3割以上を優占するタイプである。シバタイプは、耐侵食性に優れているが、維持するためには年4回以上の除草回数が必要<sup>3)4)</sup>であり、現状の年2回除草では、シバが衰退し、外来牧草へ遷移する傾向にある。そのため、現状のシバを維持する管理手法が必要である。

#### a) 「チガヤ」

春～秋に生長する中型イネ科多年草のチガヤ等が3割以上を優占するタイプである。チガヤタイプは、耐侵食性に優れている<sup>3)</sup>が、草丈が高くなり、河川巡視等への支障が懸念される。そのため、チガヤの草丈管理を行いながら、チガヤを維持する管理手法が必要である。

#### a) 「外来牧草」

牧草や法面緑化を目的に導入された外来イネ科草本(セイヨウカラシナ等を含む)が優占するタイプである。外来牧草タイプは、耐侵食性が低く<sup>3)</sup>、外来植物の繁茂に伴い草丈が高くなることから、河川巡視等への支障が懸念される。特に渡良瀬川において、セイヨウカラシナは根が肥大化し夏場に腐食するため、堤防の表土が軟化し、堤防表面の裸地化及び堤体の弱体化など堤防機能の



図-2 主な堤防植生タイプの状況

低下が懸念される。そのため、外来牧草を衰退させ、シバやチガヤ等の堤防管理上望ましい植生に遷移させる管

理手法が必要である。

## (2) 堤防植生の課題

渡良瀬川における堤防植生の課題は、a)堤体の弱体化、b)出水期間中における河川巡視等への支障などの問題が考えられ、堤体の耐侵食性の確保及び堤体の状態を把握しやすい草丈の維持等の堤防植生に求められる機能を保持するための新たな堤防植生管理が必要である。

### a) 堤体の弱体化

堤防植生の耐侵食性は、シバ・チガヤタイプが外来牧草タイプより優れているが、外来植物の侵入・繁茂等の影響により、堤体の弱体化が生じている。

### b) 出水期間中における河川巡視等への支障

堤防植生の草丈は、シバ・チガヤタイプが外来牧草タイプより低く視認性も良いが、草丈の高い外来植物の侵入・繁茂等の影響により、出水期間中における河川巡視等への支障が生じている。

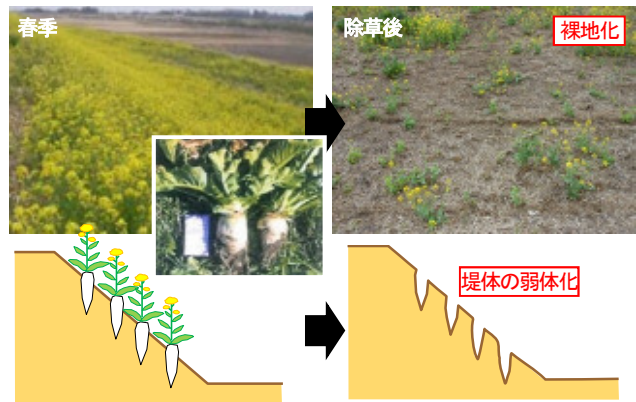


図-3 セイヨウカラシナによる堤体の弱体化(イメージ図)



図-4 外来植物の繁茂による河川巡視への支障状況

これらの課題を踏まえ、関連分野の研究者や専門家等からなる「渡良瀬川堤防管理技術検討会」及び、地域の関係者からなる「渡良瀬川堤防管理手法懇談会」を通じて、渡良瀬川における新たな堤防植生管理手法について検討することになった。

## 4. 植物成長調整剤について

### (1) 植物成長調整剤とは

一般的に「植物成長調整剤」とは、植物の生理機能を増進又は抑制する農薬の一種である。本稿では、すべての植物を枯らす目的ではなく、堤防管理上望ましい植生への維持・遷移を図ることを目的としていることから、「植物の生理機能を抑制（植物の草丈の抑制等）する農薬」として「植物成長調整剤」と定義した。

### (2) 植物成長調整剤の使用に関する動向

「植物成長調整剤」の使用は、平成2年の事務連絡（河川局河川計画課河川環境対策室長等）「農薬の使用に関する河川の維持管理について」により、原則上水道取水口の上流区域での使用が制限されており、河川砂防技術基準 維持管理編（河川編）においても、大河川における除草方法として除草剤を使用しないことが明記されている。植物成長調整剤を含む農薬については、平成14年、15年の農薬取締法の改正によって、無登録農薬の製造禁止及び輸入の禁止、無登録農薬の使用規制、農薬の使用基準の設定、法律違反の罰則などの強化が図られたことから、安全性が格段に高まっている。

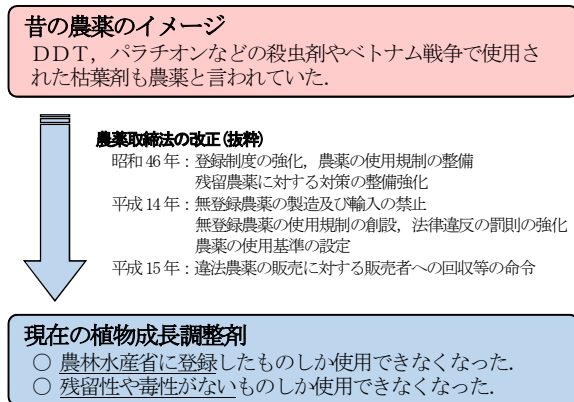


図-5 農薬取締法の改正による農薬の安全性の向上

### (3) 農薬の安全性

農薬は、農薬取締法に基づき、国の登録を受けなければ、製造（輸入）・販売・使用ができない。農薬は、食べ物の生産などに使われ、使用する場所も田畑や緑地など開放された環境だけに、病虫害や雑草への効果や農作物に対する薬害試験だけではなく、さまざまな安全性評価試験や、環境への影響試験の実施が要求されており、以下の4つの見地から、詳細な安全性評価が行われる。

①農薬の使用者に対する安全性 急性的な中毒の可能性
②農作物に対する安全性 作物の生長や収穫物の収量・品質に対する影響の可能性
③消費者に対する安全性 残留農薬による長期的暴露による、人の健康に対する影響の可能性
④環境に対する安全性 土壌、水、大気等環境への影響や、環境中の動植物への影響、又は環境中での水を通しての人への影響の可能性や分解性等

また、安全性評価では、人の健康や、農作物への影響、環境への影響を明確にし、その薬剤の効能が適切に発揮でき、かつ、農作物と人や動物、環境に影響を及ぼさない「使用基準」が定められる。

「使用基準」は、人が生涯にわたって毎日摂取しても安全な量（無毒性量）に安全係数1/100（種間差10倍×個体差10倍）をかけた値（ADI：一日摂取許容量）として、作物ごとに決められる。

## 5. 新たな堤防植生管理の検討経緯

新たな堤防植生管理の検討については、平成23、24年度から堤防植生における現状の課題等が整理され、平成25、26年度に河川外（宇都宮大学付属農場）での現地実証実験の実施、平成27年度に研究論文等による外部への情報発信、平成28年度から河川堤防での現地実証実験を実施している。今年度（平成29年度）に現地実証実験の効果検証を行う予定である。

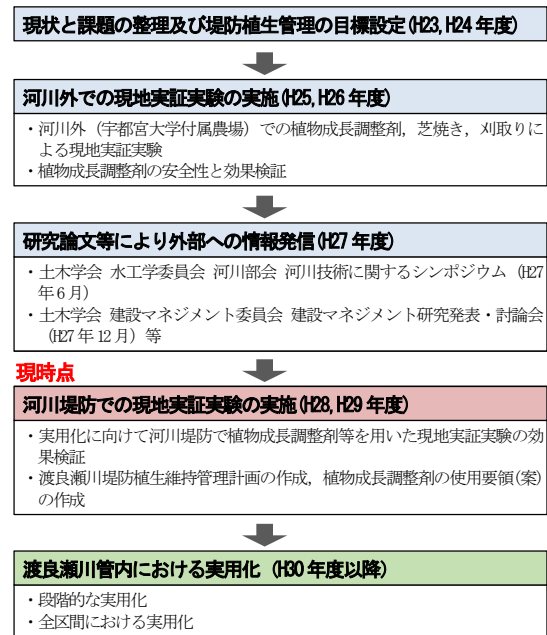


図-6 新たな堤防植生管理の検討経緯

## 6. 堤防植生管理手法の検討

### (1) 堤防植生タイプ別の堤防植生管理の目標設定

前述の現状と課題を踏まえて、堤防植生タイプ別の堤防植生管理の目標設定を行った。

堤防植生管理の目標は、現状の維持管理コスト以内で、堤防機能の低下や堤防点検等に支障のない堤防植生管理を行うことを前提に、①シバタイプは、現状の植生を保持するように管理する。②チガヤタイプは、草丈管理を前提に現状の植生を保持するように管理する。③外来牧草タイプ



は、セイヨウカラシナ等の外来牧草を衰退させ、シバやチガヤへの植生の転換を図る。を設定した。

堤防植生管理の目標	
現状の維持管理コスト以内で、堤防機能の低下や堤防点検等に支障のない堤防植生管理を行う。	
① シバタイプの堤防	現状の植生を保つように管理する。
② チガヤタイプの堤防	草丈管理を前提に現状の植生を保つように管理する。
③ 外来牧草タイプの堤防	カラシナ等の外来牧草を衰退させ、シバやチガヤへの植生の転換を図る。

この目標達成に向けて、新たな堤防植生管理手法を整理し、現地実証実験を経て、その有効性について検証を行う予定である。

### (2) 植物成長調整剤等を用いた実験ケースの選定

堤防植生管理手法は、①近年の農薬取締法改正で安全性や効果があり、平成2年以前に河川堤防での使用実績がある「植物成長調整剤散布」、②過去に行われていた伝統的な手法である「芝焼き」、③現状で行われている「刈取り」の組合せとし、現状の維持管理コスト以内で、現在の知見により効果が見込める実験ケースを選定した。

なお、実験ケースの選定にあたっては、平成25、26年度において河川外の管理された用地（宇都宮大学付属農場）にて実施された実験の効果検証結果、及びコスト評価により、絞込まれた実験ケースとする。

表-1 実験ケース

堤防植生タイプ	実験ケース
シバタイプ	1 MCPA イプロピルアン塩+ロシルフロメチル散布(H28.11月)
	2 MCPA イプロピルアン塩+ロシルフロメチル散布(H28.11月)+芝焼き(H29.2月)
	3 MCPA イプロピルアン塩+ロシルフロメチル散布(H28.11月)+刈取り(H29.8月)
チガヤタイプ	4 ビスピリバクナトリウム塩散布(H29.4月)+刈取り(H29.8月)
外来牧草タイプ (カラシナ型以外)	5 ビスピリバクナトリウム塩散布(H29.4月)+刈取り(H29.5月)
外来牧草タイプ (カラシナ型)	6 グリホサートカリウム塩散布(H28.11月)+枯草焼き(H29.2月)
	7 グリホサートカリウム塩散布(H28.11月)+刈取り(H29.5月)

### (3) 現地実証実験の実施

実験場所は、各堤防植生タイプが生育する渡良瀬川左岸19.0k堤防川裏と秋山川左岸0.3k堤防川裏(実験ケース面積：No.1～3が約330㎡、No.4～7が約225㎡)とした。

平成28年10月から実験を開始し、毎月1回(冬季は隔月)のモニタリング調査を平成29年10月まで実施する予定である。

調査項目は、堤防の目視点検時における視認性を検証

するための草丈調査と、堤防植生による耐侵食性を検証するための植物相調査を実施している。

また、これらの調査以外に、植物成長調整剤散布時における安全管理として、実験地周辺への飛散状況や周辺水路への流出状況を確認している。

### (4) 現地実証実験の結果 (H29.6時点)

平成28年11月に植物成長調整剤散布(シバタイプ、外来牧草タイプ(カラシナ型))、平成29年2月にシバ焼き・枯草焼き(シバタイプ、外来牧草タイプ(カラシナ型))、平成29年4月に植物成長調整剤散布(チガヤタイプ、外来牧草タイプ(カラシナ型以外))、平成29年5月に刈取り(外来牧草タイプ(カラシナ型、カラシナ型以外))を実施した。以降、現在までの結果として、堤防維持管理上支障となっているシバタイプ、外来牧草タイプ(カラシナ型)について、以下に示す。

#### a) シバタイプ

植物成長調整剤散布により、シバ以外の雑草が衰退・枯死し、シバが維持されている。今後、堤防内の埋土種子から発芽・生育した雑草の状況を確認し、視認性・耐侵食性に関する効果を検証する。

#### b) 外来牧草タイプ(カラシナ型)

植物成長調整剤散布により、セイヨウカラシナを含む雑草が衰退・枯死が確認された。今後、堤防内の埋土種子から発芽・生育したセイヨウカラシナ等の植生の状況を確認し、視認性・耐侵食性に関する効果を検証する。

### (5) コスト比較結果

植物成長調整剤を用いた堤防植生管理の施工単価は、通常管理(除草年2回、集草処分年1回)の施工単価に比べて、約25～60%のコスト削減が見込める。また、植物成長調整剤を用いた堤防植生管理を渡良瀬川河川事務所管内に適用した場合の概算コストは、通常管理の概算コストに比べて、約30%程度のコスト削減が見込める。

なお、施工単価の算出にあたっては、植物成長調整剤の散布歩掛は過去の実績歩掛を基に施工実績のある業者へのヒアリングを通じて設定し、通常管理の施工単価は渡良瀬川河川事務所管内における直接工事費とした。

## 7. まとめ

植物成長調整剤を用いた堤防植生管理手法は、平成25、26年度に河川外の管理地(宇都宮大学付属農場)で実施した実験の効果検証結果、及びコスト評価と同様に、渡良瀬川での堤防植生の課題である堤体弱体化及び出水期間中の河川巡視等への支障が解決できる可能性が示唆された。さらに、植物成長調整剤を用いた堤防植生管理の施工単価は、通常管理に比べてコスト削減が見込める。

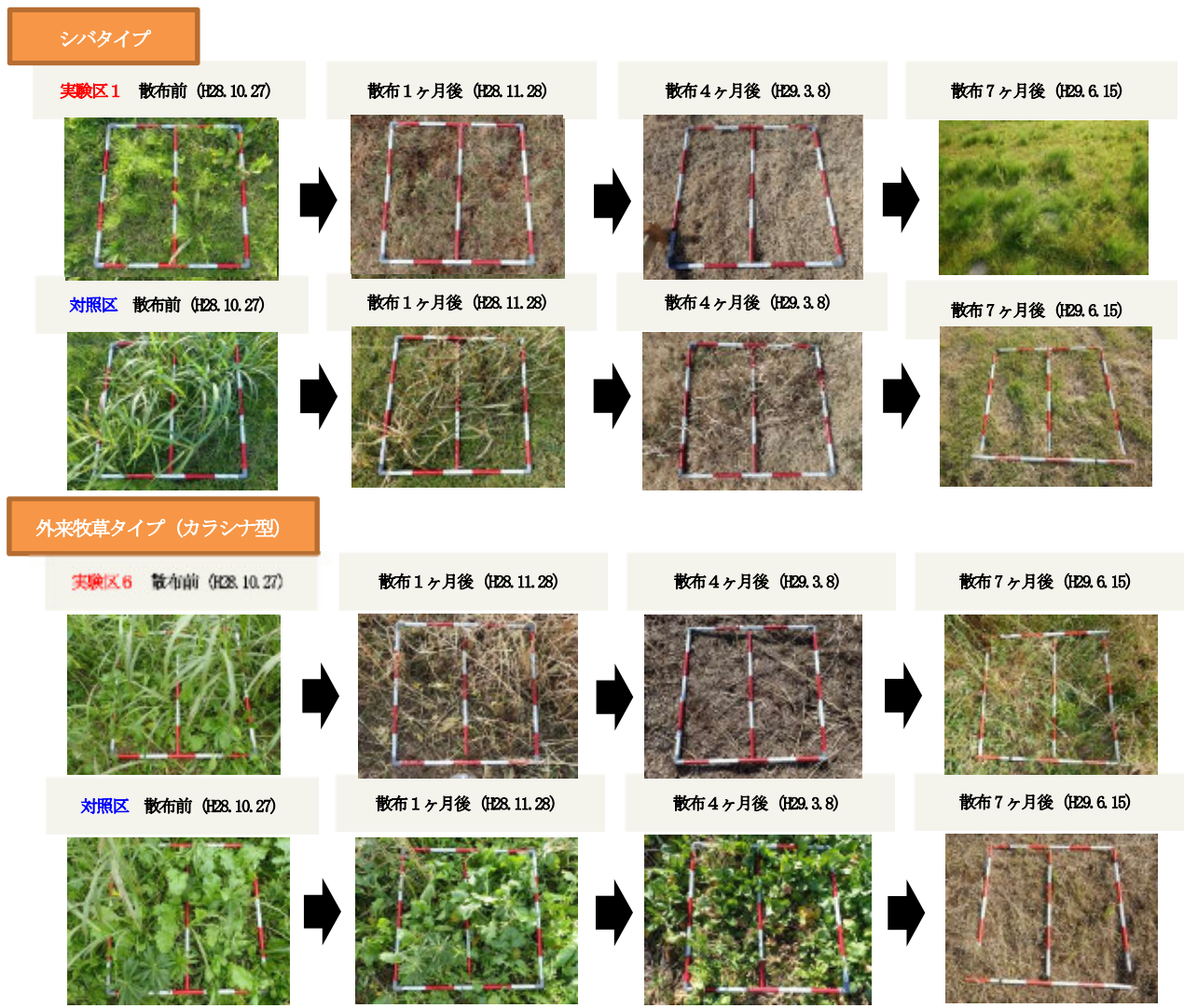


図-7 シバタイプ及び外来牧草タイプ（カラシナ型）の実験経過状況

今後、平成29年10月まで河川堤防における現地実証実験を行い、効果検証結果とコスト結果を含めた総合評価をとりまとめる予定である。

また、上記の総合評価により植物成長調整剤を用いた堤防植生管理手法の有効性が検証された場合、平成30年以降、渡良瀬川河川事務所管内において、段階的に実用化を進め、継続的に堤防植生の状況をモニタリングするとともに、全国の河川堤防でも広く普及可能な植物成長調整剤の使用要領（案）の作成、効率的な植物成長調整剤の散布方法の検討等を行っていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省 河川砂防技術基準 維持管理編（河川編），2015.
- 2) 国土交通省 関東地方整備局 木工事共通仕様書，2015.
- 3) 佐々木寧・戸谷英雄・石橋祥宏・伊坂充・平田真二：堤防植生の特性と堤防植生管理計画，河川環境総合研究所報告 第6号，2000.
- 4) 北川明ほか：植生の遷移と堤防の管理，水工学論文集 第39巻 1995.

謝辞：本稿は、「渡良瀬川堤防管理技術検討会」を通じて検討されたものであり、座長の築瀬教授（足利工業大学）をはじめ、小笠原教授（宇都宮大学）、佐々木名誉教授（埼玉大学）、清水教授（群馬大学）、松本助教（群馬大学）から貴重なご意見を頂きました。この場を借りて、御礼申し上げます。

# 長安ロダム改造事業における 堤体切削とダム本体の挙動について

竹内 大輝<sup>1</sup>・南本 秀行<sup>1</sup>・滝本 隆也<sup>1</sup>

<sup>1</sup>四国地方整備局 那賀川河川事務所 開発工務課 (〒774-0011 徳島県阿南市領家町室ノ内390)

那賀川中流部の長安ロダムでは近年の大規模な出水に対応すべく、洪水吐の2門新設を含む改造事業を行っている。洪水吐の新設にはダム堤体の切削が必要となるが、今まで、日本国内において運用中のダムを大規模に切削した事例はない。そこで、本稿ではダム堤体の切削手法と切削時の堤体の挙動モニタリング結果について報告した。ダム堤体の切削には無振動工法であるワイヤーソー工法を用いたが、ダム堤体の挙動に大きな影響は見られなかった。挙動モニタリング項目として採用した漏水量や揚圧力、堤体継目の変位は気温の変化による影響が大きく、堤体切削は施工時期を考慮して実施する必要があることがわかった。

キーワード ダム改造事業, ダム堤体切削, 新規洪水吐敷設, 挙動モニタリング

## 1. はじめに

長安ロダムは那賀川水系那賀川の中流部において、洪水調節による治水機能及び流水の正常な機能を確保すると共に電力開発を目的に昭和31年に建設された集水面積538.9km<sup>2</sup>、総貯水容量54,278,000m<sup>3</sup>の重力式コンクリートダムである。

那賀川の上流域は台風常襲地帯である四国山地の南東斜面を有するため、洪水の発生頻度が高く、流域住民は河川の氾濫被害に悩まされてきた。近年においても、平成26年8月に台風11号によって戦後最大流量を記録し、平成27年7月の台風11号では戦後第3位の流量の洪水が発生するなど、大きな洪水が頻発している。

上流域は破碎帯を形成しやすい地質的特徴を有する秩父帯を含むため、洪水時に時折大規模な地滑りが発生している。この大量の土砂が長安ロダムに流入しており、平成27年には貯水池内の堆砂量がダム建設当初計画の約3倍に当たる1,608万m<sup>3</sup>となった。さらに、貯水池内への土砂流入はダム下流における濁水の長期化を引き起こしている。



図-1 長安ロダム改造事業完成イメージパース

こうした背景から平成19年に洪水調節能力の増強及び流水の正常な機能維持を目的とした那賀川長安ロダム改造事業が発足した。図-1に長安ロダム改造事業完成イメージパースを示す。改造事業の内容は①洪水調節能力の増強を図るために洪水吐を2門新設、②環境保全対策として選択取水設備の設置、③貯水池機能の長期的な保全を目指し、貯水池やその上流における計画的な堆砂除去をそれぞれ行うことである。

中でも①の堤体に洪水吐新設をするためにはダム堤体を切削しなければならないが、今まで日本国内において運用中のダム堤体を上部から大規模に切削した事例はない。

そこで、本稿ではダム堤体を切削した手法、並びにダム堤体が切削時にどのような挙動を示すか把握するために行ったモニタリング結果を報告する。2章で堤体切削及び堤体の挙動モニタリング手法を説明し、モニタリング結果を3章で述べ、4章にまとめを記す。

## 2. 堤体切削と堤体の挙動モニタリング手法

### (1) 堤体切削手法

平成27年12月24日から平成28年6月4日において長安ロダム堤体10ブロック(以下、BL10とする)を幅11.2m、高さ37.0m、体積4,684m<sup>3</sup>切削した。切削手法には堤体に与える影響を最小限にするため、無振動工法であるワイヤーソー工法を採用した。

堤体切削の施工フローを図-2に示す。まず、堤体にワイヤーソーを通すためのパイロット孔(φ75mm)を削孔し



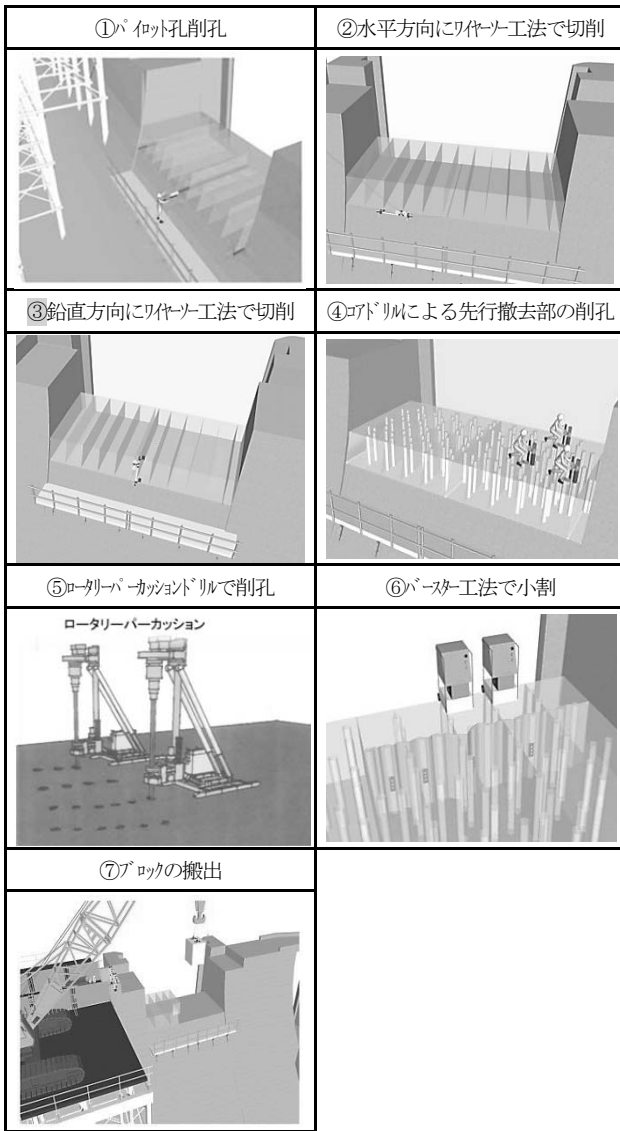


図2 堤体切削の施工フロー

た。ただし、可動ゲートの戸当り部や押し切りを行う部分のパイロット孔に関しては $\phi 200\text{mm}$ とした。続いて、ワイヤーソー工法で切削範囲のブロックを高さ1.5mで切り分け、既設堤体と縁切りを行った。1回当たりの切削面積は切削部とワイヤーとの接触長や専門業者の聞き取り調査結果を考慮し、約 $50\text{m}^2$ とした。その後、ロータリーパーカッションドリルを用い、1m程度のピッチで縦孔( $\phi 200\text{mm}$ )を空け、バースター工法によってブロックに小割し、クレーンで搬出した。

重力ダムは貯水池の水圧荷重に堤体自重と基礎岩盤のせん断抵抗によって抵抗する構造物である。そのため、堤体を切削することにより、自重が減少し、転倒・滑動する恐れがある。これを防ぐため、堤体下流に底面のせん断抵抗長の確保と増量を目的にマットコンクリートを打設した。

平成29年12月からはダム堤体11ブロック(以下、BL11とする)の切削を行う予定である。BL11の切削についても、BL10の切削と同様の手法及び手順で行う見込みである。

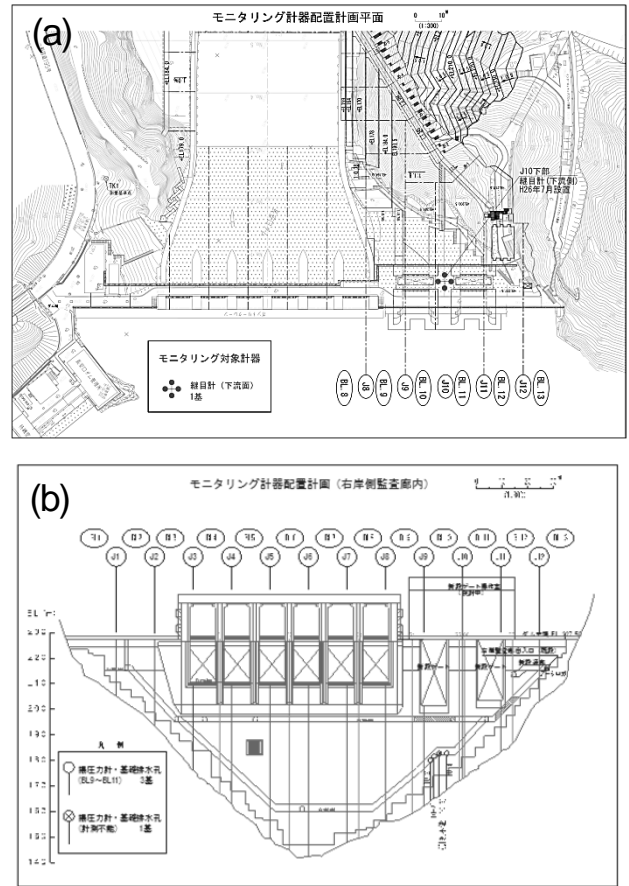


図3 (a)モニタリング計器配置平面図及び(b)正面図

表-1 モニタリング実施項目。期間は本稿に掲載したモニタリング項目の測定値の計測期間を示す。

モニタリング項目	期間	管理基準
全漏水量	H26.3.1～ H29.3.26	・貯水位や気温と無関係に増加
揚圧力	H26.3.1～ H29.3.26	・既往最大揚圧力係数を記録
継目変位	H26.7.26～ H29.3.26	・4.5mmよりも大きくなる ・2日連続して継目変位量が 0.2mm/日以上を計測

## (2) 堤体の挙動モニタリング手法

一般的な既設ダムの安全管理には過去のダム決壊事例より重要視される漏水量や揚圧力、変位の測定値を用いることが多い<sup>1), 2), 3)</sup>。本工事においても既設ダムの安全管理基準に則り、漏水量、揚圧力、堤体ブロック間の継目変位に着目し、作業中止基準を設定した。気温や降水量については長安ロダム管理事務所屋上にて観測し、貯水位データは国土交通省水文水質データベースに掲載しているものを使用した。尚、継目変位については、ダム軸方向、鉛直方向、上下流方向の3方向測定し、揚圧力については貯水位の変動に伴い増減するため、ブルドン管高さと揚圧力水頭の和を貯水深で除した揚圧力係数 $\mu_u$ を用いて管理することとした。それぞれの作業中止基準

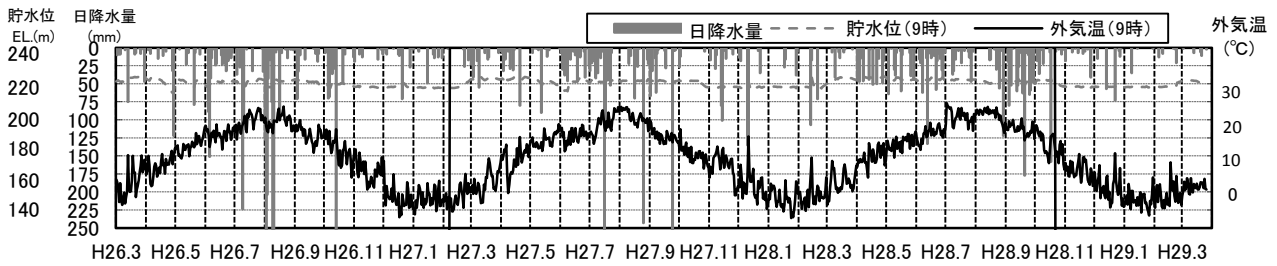


図4 平成26年3月1日から平成29年3月26日の長安ロダム管理所屋上における日降水量及び気温と長安ロダムの貯水位

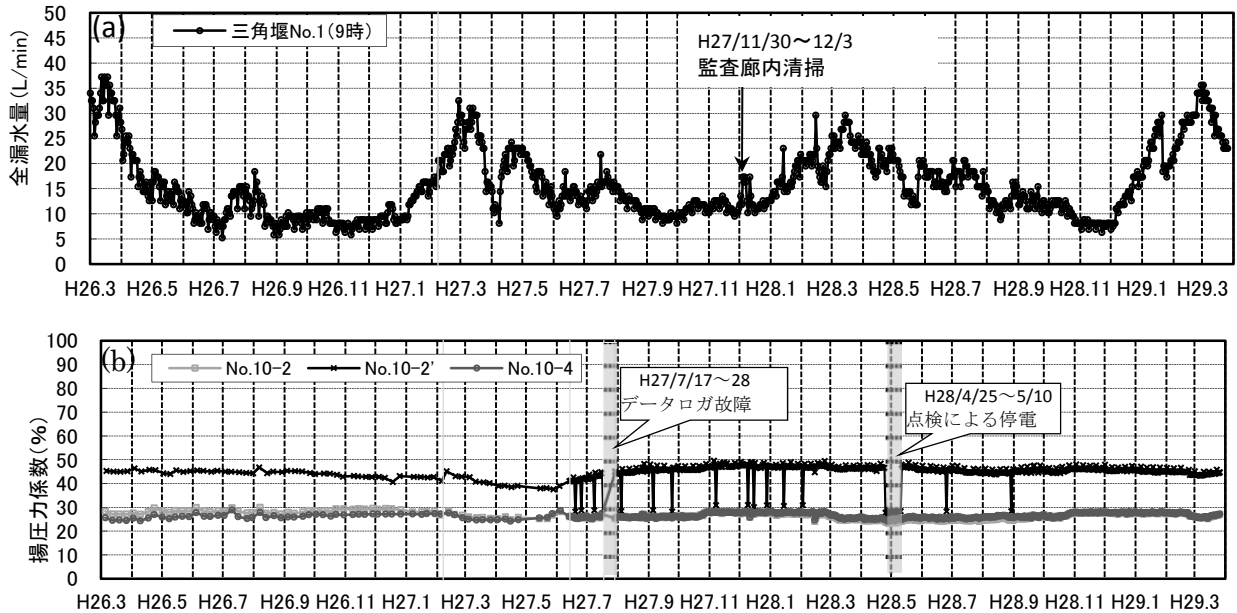


図5 平成26年3月1日から平成29年3月26日における(a)長安ロダムの全漏水量及び(b)長安ロダムBL10の揚圧力の日々変動。データロガの故障などによる測定値異常日はそれぞれ図中に記載の通りである。

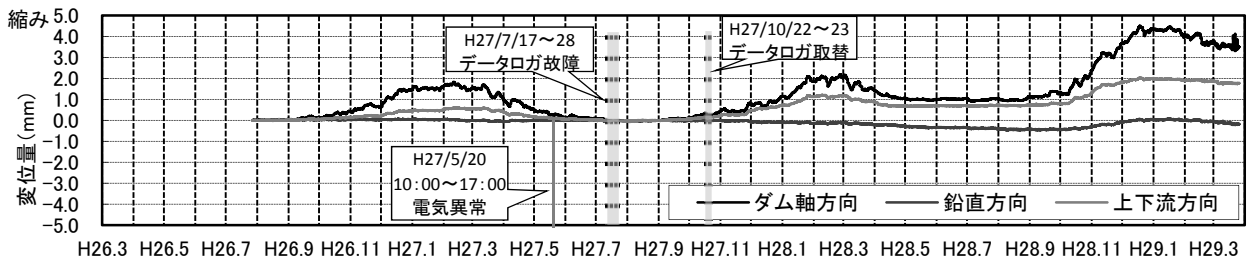


図6 平成26年3月1日から平成29年3月26日における長安ロダムJ10の3方向継目変位の日々変動。データロガの故障などによる測定値異常日はそれぞれ図中に記載の通りである。

は堤体切削前の計測値を基に定めたが、継目変位については、温度変化に伴うひずみ $\epsilon$ を表す(1)式と、1ブロックの収縮量 $\delta$ の算出式である(2)式を用いて4.5mmと定めた。

$$\epsilon = \Delta T \times \mu_t \quad (1)$$

$$\delta = \epsilon \times l_{BL} \quad (2)$$

ここで、コンクリートの線膨張係数を $\mu_t$ [1/°C]、年最高最低気温の差を $\Delta T$ [°C]、堤体1ブロックの長さを $l_{BL}$ [m]とする。尚、 $l_{BL}$ は10mであり、 $\Delta T$ は便宜上30°Cとした。モニタリング項目及び実施期間、管理基準を表-1に、モニタリング計器の配置図を図-3(a)、(b)にそれぞれ示す。モニタリング計器はダム堤体に多数設置しているが、紙面の都合上、本稿では堤体切削を行ったBL10に設置されている計器による測定結果に着目する。

### 3. 堤体の挙動モニタリング結果

#### (1) 漏水量及び揚圧力の変化

観測実施期間における長安ロダム管理事務所屋上にて観測した気温及び日降水量、長安ロダムの貯水位を図-4に、同期間における全漏水量の日々変動とBL10の揚圧力係数の日々変動を図-5(a)、(b)にそれぞれ示す。全漏水量には季節変動が見られ、3月頃にピークがある。これは、気温の低下に伴い、堤体が収縮するために生じており、気温の変動に対する位相の遅れは漏水量を規制している部分がダム堤体内部にあるために生じている<sup>1)</sup>。堤体の切削後においても全漏水量の急激な変化は見られず、安定した値を示している。

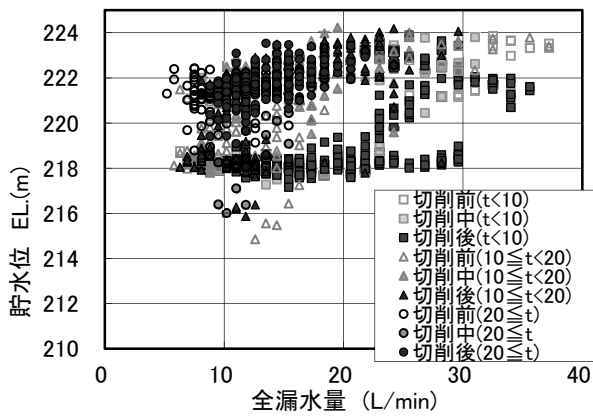


図-7 平成26年3月1日から平成29年3月26日の切削前、切削中、切削後それぞれの期間における気温の階級別の全漏水量と気温の相関図。尚、長安ロダムの洪水時最高水位はE.L.225.0m、最低水位は195.0mである。

揚圧力についても急激に変動することなく、切削前の計測値と同程度で推移している。No.10-2'が他の2計器に比べ、15%程度高い値を示しているのは、No.10-2'が他の2計器よりも孔深が長く、被圧地下水が湧き出しているためと考えられる。尚、No.10-2'からは被圧地下水の特徴である気泡が多く含まれた水が湧き出ていることを確認した。

## (2) 堤体の挙動

BL10とBL11間にある継目計(以下、J10継目計とする)の変位を図-6に示す。図-4と比較すると、気温の変動に応じて継目変位も変化していることがわかる。一方、貯水位が継目変位に与える影響は気温の変化に比べ、小さい。いずれの方向の継目計も正の値を推移しているが、これは継目計の設置時期が夏期(平成27年7月27日)であり、堤体が膨張している時に設置したためである。切削中における3方向の継目変位は前年同時期と同程度の値であるが、切削完了後の平成28年12月18日にダム軸方向の継目変位が管理目安値の4.5mmに達した。

## (3) 堤体の安全性に関する検証

一般的に既設ダム堤体の漏水量については気温や貯水位の変化に関係なく漏水量が増加しなければ安全性に問題がないとされる<sup>1)2)</sup>。観測実施期間における気温の階級ごとの漏水量と貯水位の相関図を図-7に示す。ここでは、漏水量変化を気温の変化による影響と貯水位の変化による影響に分けて考えるため、10°Cごとに階級分けした。同図より、貯水位が高いほど漏水量が多く、気温が低いほど漏水量が多い傾向が伺える。また、切削前後で同程度の貯水位の場合における漏水量に変化は生じておらず、切削後も安定した挙動を示していると判断した。

図-8は観測実施期間のダム堤体の切削前中後それぞれの期間におけるJ10継目計の温度と継目変位の相関図で

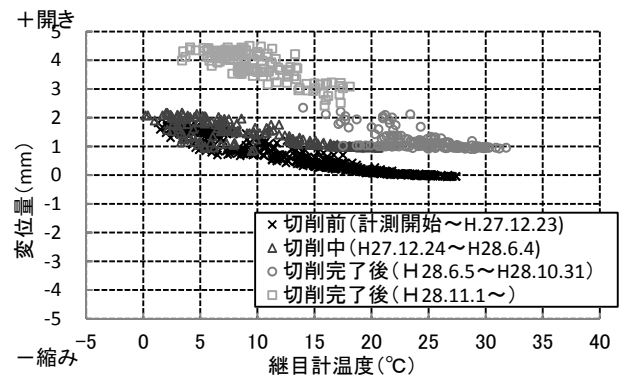


図-8 平成26年3月1日から平成29年3月26日の長安ロダムBL10の切削前、切削中、切削後それぞれの期間におけるJ10のダム軸方向の継目変位とJ10の継目計温度の相関図。

ある。同図によると、いずれの時期も温度変化に応じて変位量が変化しているが、切削後は継目変位に与える温度変化の影響が大きい。これは、切削したことにより、外気に触れる面積が増え、堤体内部が外気の影響を受けやすくなったために生じたものと考えられる。また、切削面にクラックは生じておらず、漏水量や揚圧力も増大傾向を示していないため、この傾向は異常ではないと判断した。

## 4. まとめ

本論文では、長安ロダムにおいて洪水吐を新設するために行ったダム堤体BL10の切削手法とその際に観測したダム堤体の挙動について報告した。得られた知見は下記の通りである。

- ・ワイヤーソー工法による切削手法を用いることでダム堤体を安全に切削することができた。
- ・漏水量や揚圧力、継目変位に与える影響は気温の変動によるものが最も大きい。従って、平成29年12月から行うBL11の切削に当たっては堤体の温度変化に注意して作業を行う必要がある。
- ・漏水量は切削後も気温及び貯水位の変化に伴い変動しており、安定した挙動を示した。
- ・堤体切削後は外気に触れる面積が増加したことから気温の変化に伴う継目変位量が大きくなった。
- ・今後は漏水量、揚圧力、継目変位の挙動が気温や貯水位と無関係に変動しないか注視していく。

## 参考文献

- 1) 飯田隆一: ダムの安全管理, 財団法人ダム技術センター, 2006.
- 2) 財団法人ダム技術センター: 多目的ダムの建設—平成17年版 第4巻 設計 I 編, 2005.
- 3) 財団法人ダム水源環境整備センター: ダム管理の実務, 2004.