

## ANN を用いた六角川流域浸水予測システムの構築

徳島大学大学院創成科学研究科修士課程 ○ 土山 祐司  
 徳島大学環境防災研究センター 中野 晋  
 徳島大学環境防災研究センター 蔣 景彩  
 セントラルコンサルタント (株) 圓谷 政貴

## 1. 研究の背景と目的

近年大規模かつゲリラ的な水害が多発している。記憶に新しい令和3年8月に起きた豪雨もその一つである。特に九州では8月11日から14日ごろまで、長期間雨が降り続き、佐賀県に流れる六角川では氾濫が起きた。人的被害はないものの、多くの家財に損害が発生した。六角川周辺の家屋が浸水し、氾濫場所では2m近くの浸水痕跡が残っていることから、地域住民や施設に大きな打撃を与えたことが分かる<sup>1)2)3)</sup>。六角川流域では、これまでも令和元年の甚大な水害を受けて、3度目の激特指定と国・県等が連携した「六角川水系緊急治水対策プロジェクト<sup>4)</sup>」を発表しており、非常に氾濫対策が進んだ地域であるが、依然として浸水により地域住民に被害が及んでいる。それを踏まえると六角川流域の治水は難しくとも、地域住民の適切な避難行動により、災害の被害を最小限に抑えることが求められる。そのために必要なのは災害情報だが、現状において、地域住民が適切な避難行動や事前浸水対策をとるための災害情報が不足していることが災害被害調査で明らかになった。

災害被害調査では災害を受けた施設に対して、災害発生時の浸水事前対策についてヒアリング調査を行った。その結果、病院Jでは平成2年に浸水被害を受けてから、再び同じ災害が発生しても浸水しないために、1.2mのかさ上げ工事をして、現在の場所に移転した。しかし、令和元年8月豪雨では床上約30cmの浸水被害を受けた。そして、令和3年8月豪雨では、同施設は令和元年の浸水体験から床上浸水の高さの倍以上である65cmの止水版を設置したが、氾濫水が止水版を越えて、建物に侵入し、床上約1mの浸水被害を受けた。このように、過去の災害体験から事前に浸水対策をしているものの、適切な浸水深の予測ができていないと浸水被害を受けることが分かった。(図1を参照)また、事務所Tでも大きな浸水深が確認された。令和元年8月豪雨と令和3年8月豪雨でどちらも2.0m~3.0mの浸水が広がっており、ほぼ同等の被害が発生している。この施設では令和元年8月豪雨では床上約70cm、令和3年8月豪雨では床上85cmの浸水被害が発生しているが、ヒアリング調査によると利用者の個人情報からクラウド

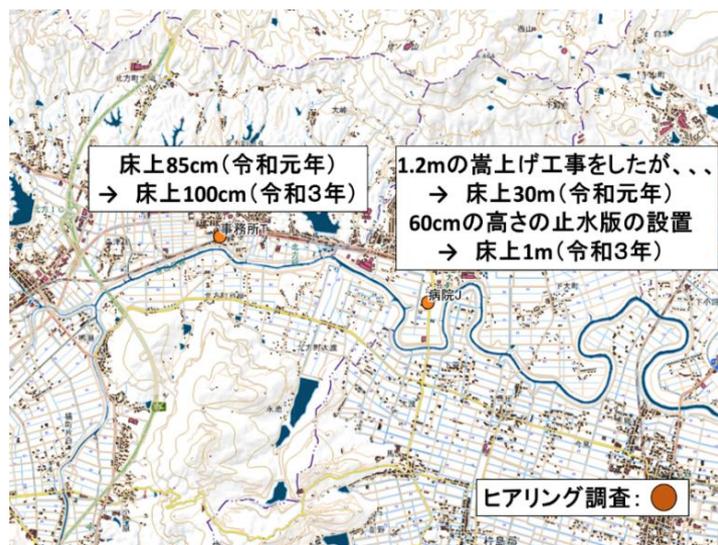


図1 ヒアリング調査を行った施設の位置図と最大浸水深 (m)

Construction of Rokkaku River basin flood prediction system using ANN, Yuuji Tsuchiyama, Susumu Nakano, Jing-Cai Jiang (Tokushima univ.) and Masaki Entani (Central Consultant Co. Ltd.)

化しており、令和3年8月豪雨においては浸水被害によるデータ消失を免れている。しかし令和3年8月豪雨において注意報が発表された時点で前回の浸水の経験から書類やパソコン等を机の上に避難させておいたが、令和元年8月豪雨の浸水深を約15cm上回ったことにより浸水被害にあった。このことから適切な被害予測ができず、浸水被害を受けたことが分かる。(図1を参照)

そうした適切な災害リスクを把握できていない要因として、浸水対策をするための適切な最大浸水深を示した浸水予測情報が不足していることが挙げられる。現在、事前に公開されている浸水予測情報は六角川水系洪水浸水想定区域図(想定最大規模/計画規模)<sup>5)</sup>から確認できる。しかし、ハザードマップ上に示されている浸水深の凡例を見ると、0.5m~1.0m, 1.0m~3.0mと幅が大きく、実際に浸水する正確な高さを把握することができないことが分かる。

浸水深の予測方法として、洪水氾濫解析手法とANNを用いた浸水予測手法が広く提案されており、その実用性が検討されている。しかし、氾濫シミュレーションは降雨量、河川の水位、地盤の飽和度、土壌の浸透度などを考慮した高度な計算を実施するため、計算に時間と労力を要することが課題である。一方で、ANNは通常、入力層と出力層で雨量と流出量を設定するのみで開発されることが多く、リアルタイムで迅速に洪水予測ができることから、近年、ANNを活用した浸水予測が注目されている<sup>6)7)8)9)10)11)</sup>。

そこで、本論文では、与えられた降雨に対して、ANNを用いて六角川流域の最大浸水深を予測できるようなシステムの構築に取り組み、そのモデルを正確性と他の河川に対する汎用性の2点から評価した。

## 2. ANNを用いた六角川流域浸水予測システムの構築

### (1) ニューラルネットワーク

#### (a). ニューラルネットワークの概要

ニューラルネットワークは動物の神経や脳の働きを数学的に模擬したコンピュータアルゴリズムである。ニューラルネットワークのアルゴリズムでは、神経細胞や脳細胞数学的モデル化したものをいろいろな形に多数組み合わせ使用している。このモデル化した細胞を一般にニューロンあるいはユニットと呼ぶ。ニューラルネットワークは与えられた既知の情報を整理し、記憶する。これは従来の情報処理手法でいうとプログラムを記述するステップに当たる。

#### (b). バックプロパゲーション法

今回はバックプロパゲーション法というアルゴリズムを取り扱う。バックプロパゲーション法は、1986年にラメルハートらによって提案された教師付き学習アルゴリズムで、動物の神経細胞の働きを模倣したものである。一つの神経細胞に着目すると、ほかの神経細胞が活性化し、軸索、シナプスを通して次の細胞へと刺激を伝達する。BP法のネットワークは図2のように入力層、中間層、出力層から構成される。入力層と中間層、および中間層と出力層のニューロンは互いに密に結合しているが、同じ層のニューロン間には結合はない。入力層に提示された学習パターンは中間層へ、そして出力層へと伝播され、出力層からの出力値と学習データが比較される。そして、出力値と学習データの誤差が最小になるように結合重みを調整することで学習が行われる。

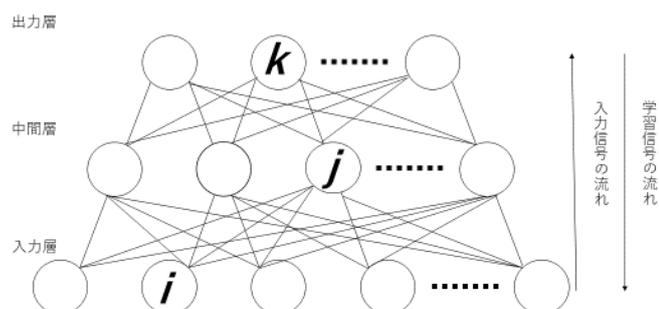


図2 一般的な階層型ニューラルネットワークの構造

(2). 六角川流域浸水予測システムの構築

(a). データのリソース

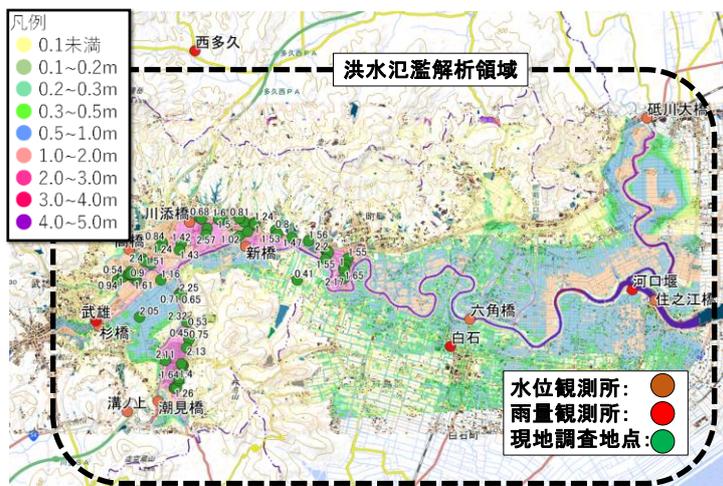


図3 洪水氾濫解析領域と現地調査地点の最大浸水深 (m)  
(図中には氾濫解析の結果も示す)

ニューラルネットワークを用いた洪水予測システムを構築するためには学習データが必要になる。六角川流域での過去の災害正確な最大浸水深のデータが少ないため、今回は人工的に氾濫解析シミュレーションを用いて作成したデータを学習データとして利用した。

氾濫解析シミュレーションにおいては内外水や下水道を同時に扱える故岡部健士教授が開発したXOKABEをエンジンとするソフトウェア「AFREL-SR」(ニタコンサルタント株)を用いた。解析領域は六角川流域(図3を参照)であり、圓谷らの研究<sup>11)</sup>を参考にして、解析条件と氾濫元基本データ(表1)を設定した。

図4は氾濫解析による解析値と現地調査による実測値との相関関係を表しており、平均二乗誤差は0.135m<sup>2</sup>、平均二乗誤差の平方根は0.367mである。

(b). ネットワーク構造

入力層は実際の状況をカバーし、あらゆるシステムにおける洪水災害の本質を反映したものでなければならぬし、

表1 解析条件と氾濫元基本データ

背景地図	国土地理院 基盤情報地図
地盤高	国土地理院 基盤情報地図
地目データ	国土数値情報 土地利用細分メッシュ
メッシュサイズ	20m×20m
計算時間間隔	0.05秒
計算時間間隔	36時間
雨量観測所	白石/武雄/河口堰/南溪/西多久
盛土データ	六角川水系河川整備計画(附図) <sup>12)</sup>
排水機場の運転状況	六角川排水ポンプ場運転調整に関する資料 <sup>13)</sup>

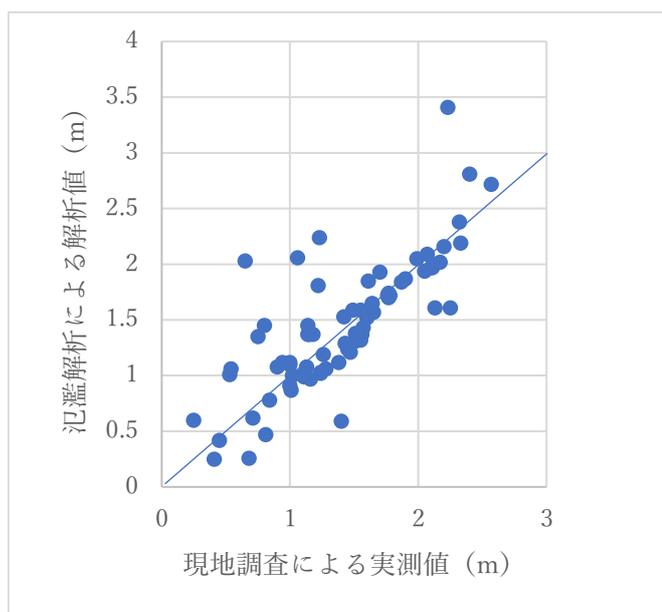


図4 氾濫解析による解析値と現地調査による実測値との相関関係

入力因子はできるだけ少なく、有効な因子を用いる方が精度の安定性が得られ、欠測によるリスクも少ない。ここで、六角川の河川特性として、感潮区間が大きく、潮位の影響を受けやすい特徴を持っていること、令和3年と令和元年の災害事例から、降雨パターンや総降雨量の違いから浸水スピードや浸水深等が異なることから、入力データを総降雨量や降雨パターン、潮位に決定した。総降雨量に関しては、36時間雨量でデータを与えている。令和元年と令和3年の36時間雨量を、アメダス確率降雨計算プログラム<sup>14)</sup>を用いて、確率降雨量に換算すると、60年~70年の間に収まるため、これから発生する災害による浸水予測を行うにおいて、70年よりも大きい確率降雨での予測が正確にできることが期待されていることを踏まえ、今回は150年までの確率降雨、計13パターンで設定した。降雨パターンにおいては、フラット型、中央集中型、二山型の、中央集中型の3パターンで、中央集中型を2つに分けた4つの降雨パターンを設定した。(図5を参照) 潮位に関しては令和3年時と同位相の潮位(時間は2021/08/13 7:00~2021/08/14 19:00)と逆位相の潮位の2パターンを設定した。

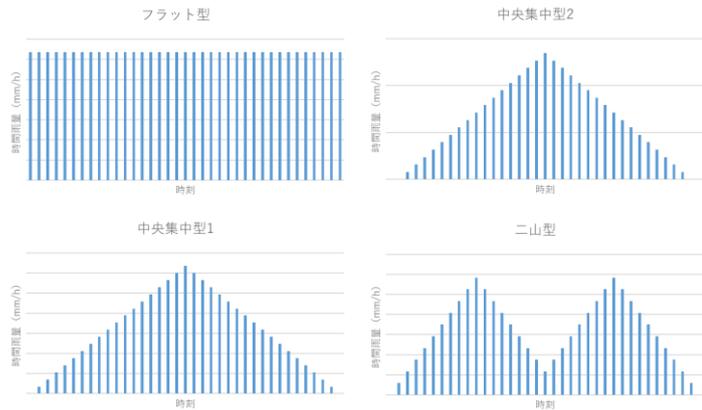


図5 降雨パターン

中間層のユニット数は15で設定した。今回、氾濫解析において、解析時間を36時間に設定してシミュレーションを行っているため、出力層は現地調査/ヒアリング調査した地点と観測所計85か所(図3を参照)での現時点から36時間後までの間の最大浸水深とした。

表2 学習パラメータの一覧表

温度 (シグモイド関数の勾配)	1
学習率	0.2
合成を行う分散の上限値	0.01
合成を行う相関係数の下限値	0.99
忘却量	0
学習回数	10000
誤差による学習の打ち切り	0.0001
正規化の幅	0~0.9

今回、氾濫解析において、解析時間を36時間に設定してシミュレーションを行っているため、出力層は現地調査/ヒアリング調査した地点と観測所計85か所(図3を参照)での現時点から36時間後までの間の最大浸水深とした。

(c) 学習パラメータ  
学習パラメータは以下の通りで設定した。(表2を参照) 今回、学習回数は10000回で設定し、誤差による学習の打ち切りは0.0001mで設定した。正規化の幅を0~1にしてしまうと、今回入力したデータが頭打ちになる。そのため、今回の入力データよりも大きい確率降雨の災害が発生した場合に、正確な最大浸水深を予測できないため、最大値を0.9に決定した。

(c) 学習パラメータ

(d) ネットワークの学習  
学習の目的はBPアルゴリズムにもとづいて重み値を変更する

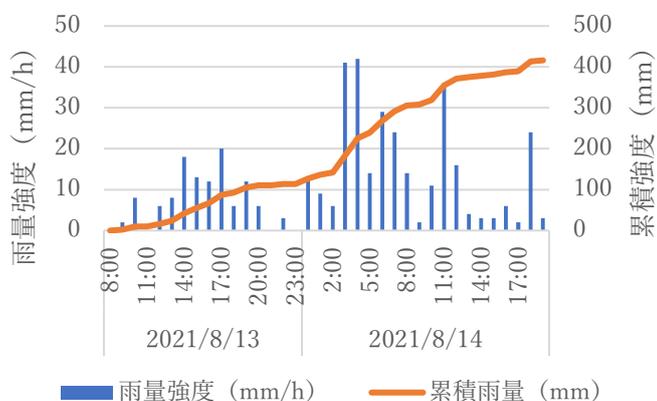


図6 令和3年8月豪雨における白石雨量観測所の雨量推移

ことで、計算データと学習データ間の誤差を減少させることである。

学習データを入力して、ニューラルネットワークを数回実行し、学習させる。

入力ニューロンはシナプスで重みを与えられ、そのニューロンに来る全てのシナプスの出力がバイアスを伴って計算される。その後、重み付き和に活性化関数が適用される。活性化関数の出力は出力層の入力として扱われる。出力層では1つのニューロンで構成されている。出力層では繰り返し同じ処理がなされ、最終的に出力が生成される。これを繰り返し、算出された値と学習データとの誤差が打ち切り誤差内に収まるまで学習を続ける。学習回数が設定された回数に到達すれば、その時点で学習が終了する。

テストデータは令和3年8月豪雨における六角川流域での氾濫解析による解析値を用いている。総降雨量は416mmで、降雨パターンは二山型である。また、潮位は同位相である。(図6を参照)

### 3. モデルの精度評価

#### (1). 本研究の評価方法

モデルの精度評価は、予測の誤差や観測値と予測値間の変動で説明される。文献では精度を測定するための多くの性能評価法があり、それぞれに利点と限界がある。今回は平均二乗誤差と平均二乗誤差の平方根を用いた。

#### (2). 学習結果

10000回の学習回数では打ち切り誤差内に収めることができなかった。

10000回の学習で正規化された後の誤差は0.000535mであり、図7から学習回数が100回付近に到達した段階から、誤差が収束に向かっていることが分かった。

図8はニューラルネットワークによる予測値(計算データ)と氾濫解析による解析値(テストデータ)との相関関係を示しており、平均二乗誤差は0.390m<sup>2</sup>であり、平均二乗誤差の平方根は0.625mである。出力層の数が多いことでネットワークが複雑怪奇になっていることが、この誤差を生み出している要因と考えられる。

一方で、ニューラルネットワークによる予測値(計算データ)と現地調査による実測値との平均二乗誤差は0.417 m<sup>2</sup>であり、平均二乗誤差の平方根は0.646mである。(図9を参照)ニューラルネットワークによる予測値(計算データ)と現地調査による実測値の誤差が氾濫解析による解析値(テストデータ)との誤差よりも大きくなったのは、学習データとして用いた氾濫解析による解析値と現地調査による実測値にズレがあったことが要因の一つと推測される。(図4を参照)

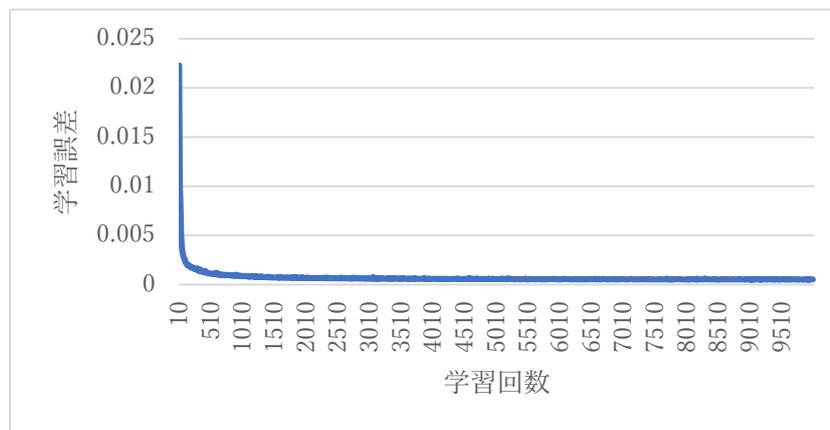


図7 学習誤差の収束状況

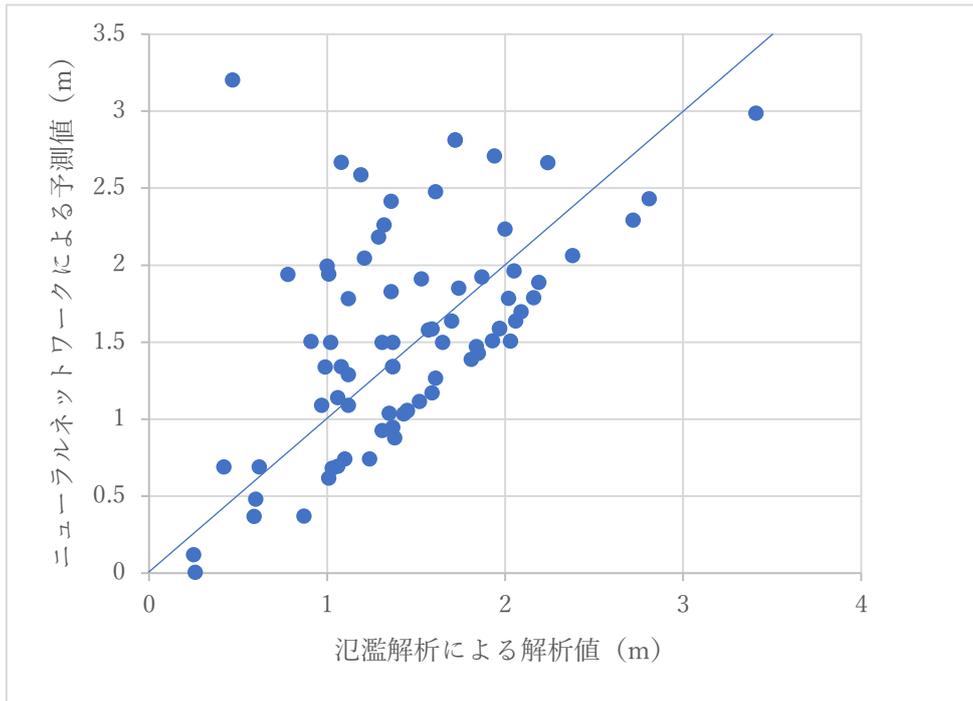


図8 ニューラルネットワークによる予測値（計算データ）と  
氾濫解析による解析値（テストデータ）との相関関係

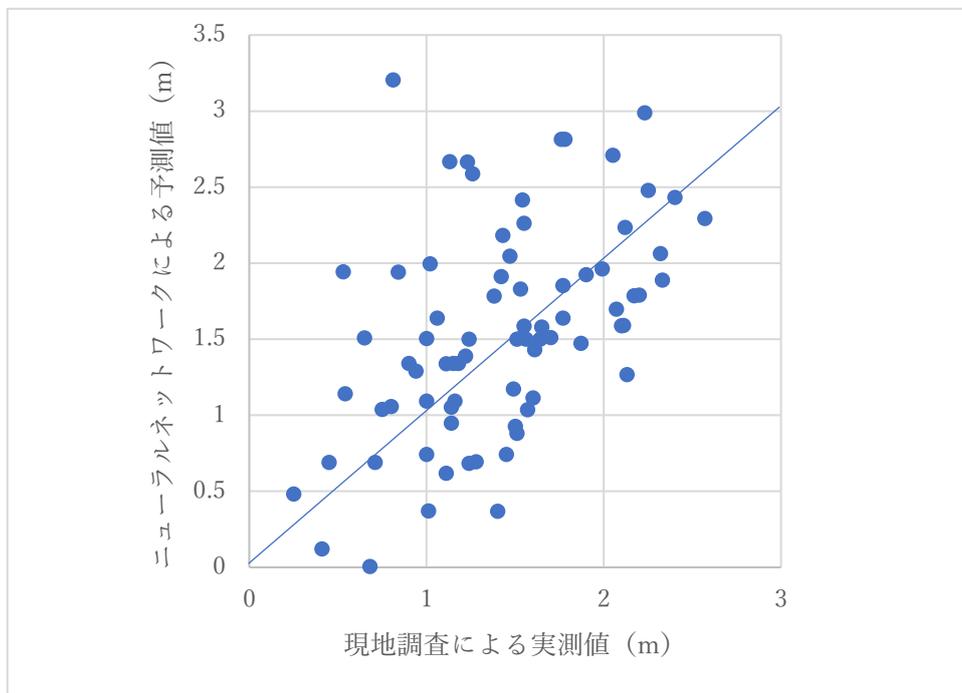


図9 ニューラルネットワークによる予測値（計算データ）と  
現地調査による実測値との相関関係

#### 4. 考察

今回開発した ANN を用いた六角川流域浸水予測システムを正確性と他の河川に対する汎用性の 2 点から評価した。

##### (1). システムの正確性

今回、六角川流域において、過去に浸水被害を受けた際の浸水深のデータが不足していたため、氾濫解析により人工的なデータ作成し、学習データとして活用した。これにより、構築された浸水予測システムの学習結果から、氾濫解析による解析値(テストデータ)とは平均二乗誤差の平方根が 0.625m、現地調査による実測値とは平均二乗誤差の平方根が 0.646m であることが分かった。

システムの正確性を向上させるため、学習データとニューラルネットワーク構造の 2 点から考察した。

##### (a). 学習データ

一般にニューラルネットワークのモデルにおいて、多数事例から作られたモデルは頑健で一般性が高いのに対して、少数の事例から作られたモデルは一般性が低く、新規の入力に対して、適切な出力を与えることが難しい。そのため、システムの構築に使用した 85 パターンの学習データに加えて、さらに氾濫解析により学習データ数を増やす必要がある。また、現地調査による実測値との誤差が大きい理由として、図 4 から氾濫解析による解析値と現地調査による実測値の誤差が大きいことが要因の一つとして推測されるため、氾濫解析の精度も同時に高める必要がある。

今回、学習データとして用いた氾濫解析のパラメータは令和 3 年時点で国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所が発表している六角川水系整備計画<sup>12)</sup>をもとに解析シミュレーションを実施しているため、河川整備の進捗状況により、パラメータを更新する必要がある。

##### (b). ニューラルネットワーク構造

まず、入力層について、総降雨量は今回、13 パターンの確率降雨の総降雨量を試したが、それ以外の確率降雨のパターンを含めたシステムを構築する必要がある。降雨パターンや潮位においても同様にこれから発生する災害は今回入力層で使用したパターン以外である可能性を考慮すると、パターン数を増やす必要がある。

出力層について、今回、ヒアリング調査した箇所も含め、85 か所の最大浸水深を使用したため、ネットワークが複雑になり、誤差を大きくした要因の一つである推測される。そのため、今回浸水予測システムを流域全体から行政区間ごとに構築することを提案する。システムを複数構築することにより、1 つのシステムのネットワークでの出力層の数を減らすことができ、誤差の縮小が期待できる。また、ヒアリング/現地調査した箇所での現時点から 36 時間後までの間の最大浸水深を出力層のニューロンとして与えたが、過去の研究<sup>9)</sup>から予測する最大浸水深は予測する時間軸が短いほど、良好な結果が出ていることから予測する時間を減らすことで精度の向上が期待できる。

##### (2). 他の河川に対する汎用性

今回六角川流域に住んでいる地域住民が適切な浸水予測ができていないことで、浸水被害を受けていることに着目し、浸水予測システムのニューラルネットワーク構造において、出力層を現時点から 36 時間後までの間の最大浸水深に決定したが、適切な避難行動をする上で浸水開始時間を正確に予測することも重要である。なぜなら、特に災害実績がない地域では避難行動を開始する時間が遅いと予想されるため、いち早く浸水開始時間を予測するシステムにより、地域住民が迅速に避難行動を促す効果があると推測されるからだ。また、今回のシステムの構築において、入力層は総降雨量、降雨パターンに加えて、六角川流域の河川特性を反映させるため、潮位を用いたが、流域ごとに河川特性が異なるため、流域ごとにニューラルネットワークを再度構築し直す必要である。

謝辞：本調査にご協力いただきました施設関係者の皆様に心から感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 気象庁 前線による大雨令和3年（2021年）8月11日～8月19日  
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2021/20210831/20210831.html>
- 2) 気象庁 令和3年8月の記録的な大雨の特徴とその要因について  
<https://www.jma.go.jp/jma/press/2109/13a/kentoukai20210913.pdf>
- 3) 国土交通省 九州地方整備局 武雄河川事務所 六角川水系緊急治水対策プロジェクト一覧表  
[https://www.qsr.mlit.go.jp/takeo/site\\_files/file/rokkaku\\_project/rokkakugawa\\_project.pdf](https://www.qsr.mlit.go.jp/takeo/site_files/file/rokkaku_project/rokkakugawa_project.pdf)
- 4) 令和3年8月豪雨による六角川周辺での浸水被害調査  
[file:///C:/Users/nakan/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/f525ad7f-e3e1-4572-b671-7c5700980bb5/r03nhf\\_73.pdf](file:///C:/Users/nakan/AppData/Local/Temp/MicrosoftEdgeDownloads/f525ad7f-e3e1-4572-b671-7c5700980bb5/r03nhf_73.pdf)
- 5) 六角川水系洪水浸水想定区域図（想定最大規模/計画規模）  
[https://www.qsr.mlit.go.jp/takeo/site\\_files/file/prepare\\_bousai/kouzuisinsuisouteikuiki/01-1\\_rokkakusuikeisouteisaidai.pdf](https://www.qsr.mlit.go.jp/takeo/site_files/file/prepare_bousai/kouzuisinsuisouteikuiki/01-1_rokkakusuikeisouteisaidai.pdf)
- 6) 都市域の内水氾濫モデルの検討と浸水時対策への応用について  
[4D6963726F736F667420576F7264202D2090858D483230313294C397942D30388F4390B35F8D828BB492C78B4C3033](https://www.jst.go.jp/record/448888) <jst.go.jp>
- 7) 都市内水域における局所集中豪雨に対応したリアルタイム浸水予測手法に関する基礎的検討  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/67/4/67\\_4\\_I\\_931/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/67/4/67_4_I_931/_pdf/-char/ja)
- 8) 浸水実績・降雨記録を用いた機械学習に基づく簡易浸水予測システム  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/67/4/67\\_4\\_I\\_937/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/67/4/67_4_I_937/_pdf/-char/ja)
- 9) 河川特性を反映したニューラルネットワーク洪水予測の精度向上  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/river/19/0/19\\_295/\\_article/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/river/19/0/19_295/_article/-char/ja)
- 10) ニューラルネットワークによる水位予測システムの開発  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/1988/7/27\\_2\\_90/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjshwr/1988/7/27_2_90/_article/-char/ja/)
- 11) 降水量予測に適したニューラルネットワーク構造  
[https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2001/2001\\_12\\_0885.pdf](https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2001/2001_12_0885.pdf)
- 12) 国土交通省 九州地方整備局 武雄河川事務所 六角川水系河川整備計画（附図）  
[https://www.qsr.mlit.go.jp/takeo/site\\_files/file/rokkaku/seibikeikaku/2019rokuseibian-fuzu.pdf](https://www.qsr.mlit.go.jp/takeo/site_files/file/rokkaku/seibikeikaku/2019rokuseibian-fuzu.pdf)
- 13) 国土交通省 九州地方整備局 武雄河川事務所 六角川排水ポンプ場運転調整に関する資料  
[https://www.qsr.mlit.go.jp/takeo/site\\_files/file/rokkaku/05pompcyouseihausin2.pdf](https://www.qsr.mlit.go.jp/takeo/site_files/file/rokkaku/05pompcyouseihausin2.pdf)
- 14) アメダス確率降雨計算プログラム  
<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/offer/amedas/top.htm>