

# 洪水予報への活用に耐え得る精度や安定性の確保 に向けた水害リスクラインの高度化検討

株式会社 建設技術研究所 ○北口 慶一郎  
株式会社 建設技術研究所 深草 新  
株式会社 建設技術研究所 由良 英作  
株式会社 建設技術研究所 原田 翔太  
株式会社 建設技術研究所 濱田 拓也  
一般財団法人 河川情報センター 中安 正晃  
一般財団法人 河川情報センター 久保 英二郎

## 論文要旨

「水害リスクライン」は、整備局ごと（水系ごと）に稼働している洪水危険度表示システムにより、各水位観測所の水位や各河川の縦断水位を予測し、河川管理者や地域住民に洪水発生の危険度を予め周知するものである。本検討では、この精度や安定性を従来よりも高いレベルで確保するため、①新たな精度評価方法の適用による予測信頼性の向上、②安定稼働に資する欠測補填方法の高度化、③モデルの高度化に伴う計算負荷増大に対応したサーバ仕様の最適化を図った。検討の結果、予測精度の定量評価方法の確立と適用による予測精度の向上、長時間欠測時の補填方法の実用化、サーバ整備における基礎資料の作成と全国的な共有・活用が実現した。

キーワード：洪水予報、予測精度、定量指標、安定性、オンプレ方式

## まえがき

「水害リスクライン」は、平成 29 年度に先行 2 水系での検討が開始された後、平成 30 年度には全国の水系で本格的なモデル・システム構築が実施され、平成 31 年度より運用が開始されている。当社でも全国複数の水系で構築業務を担当しており、予測精度の確保や予測システムの安定性に関する知見を社内共有しながら、当該システムを発注者に提供してきた。

令和 4 年 6 月以降、氾濫危険情報は、実況水位に加えて予測水位も参照して発表できるように運用が変更されており、予測水位が水防活動や避難誘導等に直結する状況となったことから、従来よりも高いレベルの精度や安定性が求められるようになってきている。

本検討では、「水害リスクライン」における洪水予測モデル・システムの精度や安定性を従来よりも高いレベルで確保するため、①新たな精度評価方法の適用による予測信頼性の向上、②安定稼働に資する欠測補填方法の高度化、③モデルの高度化に伴う計算負荷増大に対応したサーバ仕様の最適化を図った。

## 1. 定量指標を統合した新たな精度評価方法の適用による予測信頼性の向上

### (1) 精度評価に関する課題

洪水予測モデルの精度評価には、ピーク生起時刻誤差・ピーク水位誤差・波形誤差など各種の定量指標<sup>1)</sup>が用いられてきた。定量評価では、指標ごとに絶対的な評価ができるものの、各指標間の重要度のバランス（評価の重み付け）に基準がないため、各指標の評価値を踏まえた総合評価が難しいことが課題であった。

### (2) 定量指標を統合化した精度評価方法の検討

河川管理者や地域住民が認識する予測水位の精度は、目視により定性的に評価されることが多い。工学的には定性評価は定量評価に劣るとみなされることもあるが、リスク情報を用いる現場においては、定性評価も重要であるといえる。

そこで、複数地点の予測計算結果を対象に、定量評価の課題と考えられる以下の①～③の観点を踏まえて配点方法や重み付けを変化させ、どのような設定とすれば定量評価と定

性評価が整合するか感度分析した。

- ①予測水位が実績に対して「高め/早め」となるのを高評価とするか否か
- ②基準水位到達時における時刻誤差・水位誤差を評価指標に加えるか否か
- ③各指標のランクごとの配点に段差を設けるか否か

上記の分析の結果、定量評価結果が定性評価結果(目視により実績と予測の誤差が小さいものから◎、○、△、×と4段階で評価)と概ね整合する条件は以下のとおりであることが確認された(表-1)。

- ・各定量指標で、標本の大半が存在する範囲を把握し、その中の誤差最大値付近を0点、誤差なしを満点として、その間を線形で徐々に変化させた傾斜配点とする(図-1)。

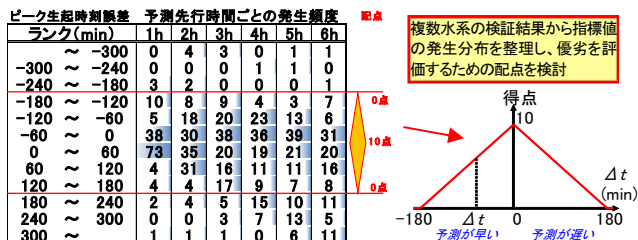


図-1 定量指標の配点設定例

ピーク生起時刻誤差	ピーク水位誤差	実績水位と予測水位の相関	基準水位到達時の時刻誤差	基準水位到達時の水位誤差	RMSE(平均二乗偏差)	総合点
±0hr	±0m	1.0	±0hr	±0m	0.0	100/100
線形補間	線形補間	線形補間	線形補間	線形補間	線形補間	100/80
±3hr以上	±1m以上	0.9以下	±3hr以上	±1m以上	0.5以上	

図-2 定量指標による最適な総合評価方法

表-1 定量評価値別の定性評価結果分布

総合点 定量評価 毎の 地点 数	定量評価による総合点	定性評価結果毎の地点数				定性評価によるランク毎に最も多い定性評価結果
		◎(優)	○(良)	△(可)	×(不可)	
85~100	1	0	0	0	◎	
80~85	9	3	0	0	◎	
75~80	3	10	1	0	○	
70~75	1	12	5	0	○	
65~70	0	13	4	0	○	
60~65	0	8	6	0	○	
55~60	0	3	14	2	△	
50~55	0	0	8	3	△	
45~50	0	0	10	5	△	
40~45	0	0	9	6	△	
35~40	0	0	1	2	×	
30~35	0	0	0	3	×	
0~30	0	0	0	1	×	

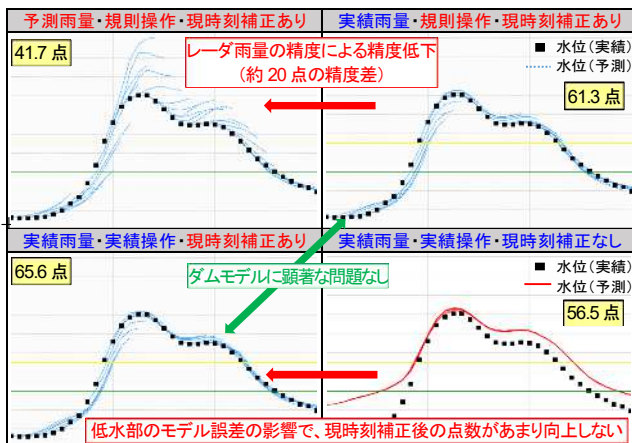


図-3 定量評価による精度低下要因の分析例

- ・各定量指標間には重み付けを行わず、上記の配点をそのまま合計する(図-2)。

(3) 定量的な総合評価による精度低下要因の抽出と予測信頼性の向上

(2) で示した最適な定量評価方法を、複数の水系・観測所における精度検証に適用することで、精度の低い箇所を客観的に見極めることができるようになった。また、降雨(実績/予測)、ダム操作(実績/規則)、現時刻補正(有/無)等の解析条件を変更した複数ケースの予測シミュレーション結果に対して上記の方法を適用することで、主な精度低下要因の客観的な抽出を可能とした(図-3)。これらにより、精度向上の優先度が高い地点を漏れなく把握でき、かつ地点ごとに優先して改善すべき観点(ダムモデルの条件、流出モデルの精度、基底流量の設定等)を重点的に改善することにより、水系全体の予測信頼性が大幅に向上した。

2. 継続的な安定稼働に向けた欠測補填処理の高度化

(1) 長時間欠測時における欠測補填処理の課題

従来(本検討着手時)のシステムでは、欠測・閉局によりテレメータ観測水位を取得できない状況が長時間(現行のシステムにおいて、1時刻の予測計算を行う際に過去の実績期間としてデータを扱う6時間以上)続くと、観測値の補填ができなくなり、実績値を使用するデータ同化や現時刻補正が機能しなくなる。この事象により、予測値が前時刻から急変してしまう問題や、水理量の急変により計算の不安定が生じる問題が稀ながら確認されており、長時間の欠測・閉局時にも観測値の補填を継続する仕組みの導入が求められた。

(2) 欠測補填処理を継続する方法の検討

従来のシステムでは、過去の6時間以内に1時刻でも観測値があれば、その値を使用して欠測補填をしていた。逆に、1時刻も観測値がなければ実績値が得られない状態で計算を実行し、データ同化や現時刻補正をしない計算結果を予測値として出力していた。

(1)の課題に対応するため、システムにおける観測データの授受や計算モデルへの引き渡し手順を踏まえ、6時間以上の長時間欠測時でも欠測補填処理を継続できる方法を検討した。各時刻において処理する実績データの期間を長時間化する方や上下流地点の実績値から補間する方法等を比較検討し、実現性や運用面の観点から以下の方法が有効であることを確認した。

- ・ある時刻に現時刻の欠測補填を実施し、その補填後の水位データを次時刻以降でも使用できるよう、順次、計算条件として引き継いでいく方法(図-4)

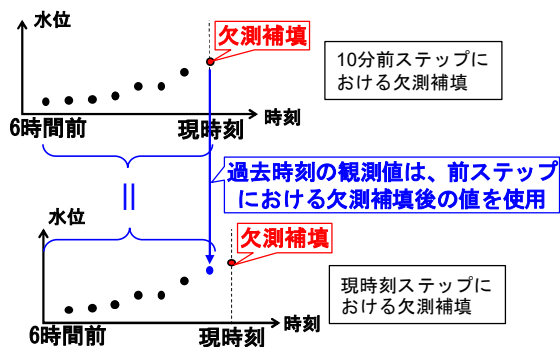


図-4 欠測補填処理を継続する方法

ただし、この方法を導入する場合、現時刻の観測値が欠測の場合の補填方法を別途検討する必要がある。これについては、「水量の急変を防ぐ」といった観点も踏まえ、次項で検討する。

### (3) 水量の急変を防ぐための現時刻観測値の欠測補填処理方法の検討

水量の急変を防ぐための現時刻観測値の欠測補填処理方法として、「①観測値を使用する方法」、「②計算値を使用する方法」、「③欠測補填せず、現時刻補正も実施しない方法」の3手法が考えられる。また、「①観測値を使用する方法」は、「①-1 過去の観測値を使用する方法」と「①-2 近傍観測所の観測値を使用する方法」に大別され、それらの複合的な手法として「①-3 過去の観測値および近傍観測所の観測値を使用する方法」も考えられる。

#### 1) 欠測補填方法の一次選定

考えられる欠測補填方法の中から、「毎回自動で適用することが可能なこと」および、「全水系・全地点にモデル化できること」という必要条件を踏まえ、現行システムへの実装に適していると考えられる方法を一次選定した。

#### a) AI 手法を用いた欠測補填方法の適用性分析

「①-3 過去の観測値および近傍観測所の観測値を使用する方法」に該当する手法として、近年、洪水予測への適用に関する有効性が評価されてきている AI モデル(深層学習)を活用して、実況水位欠測時に現時刻の水位を推定し、それを観測水位の代わりに洪水予測に適用する方法が考えられる。欠測となった現時刻の水位のみを推定する場合、児島らの既往検討事例<sup>2)</sup>で言及されているように、当該観測所の過去データを十分に学習している AI モデルであれば、実態に近い値を精度良く出力できる可能性がある。

本検討では、一般的に精度が良好といわれており、洪水予測分野への適用事例が多い「多層ニューラルネットワーク(DNN)」<sup>3)</sup>を用いて、欠測補填への適用性を検討した。表-2

表-2 DNNによる欠測補填モデルの概要と入力データ

DNNによる欠測補填モデルの概要	入力データ		出力データ
	60~10分前まで	現時刻	
検討対象観測所の「①過去の水位」と補填対象観測所の「②現時刻水位」をもとに、検討対象観測所の現時刻水位を算出	・水系内の全対象観測所の水位	・補填対象観測所の水位	・検討対象観測所の現時刻水位

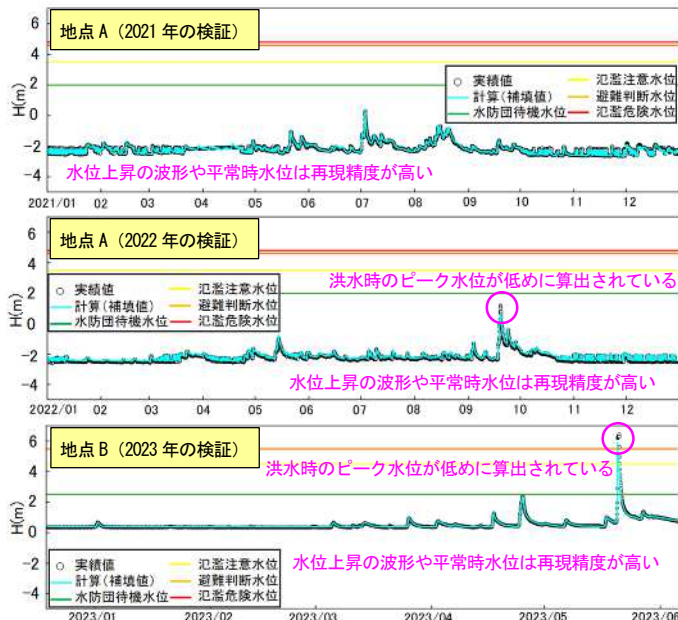


図-5 DNNによる欠測補填モデルの精度検証結果例

に示すように、水系内の全観測所に対して現時刻水位を補填する1つのDNNモデルを作成し、欠測補填の精度を評価した。なお、表-2に示す「補填対象観測所」は、検討対象観測所の実績水位と上下流の複数の観測所水位との相関分析を行い、相関係数が最大となる観測所とした。検討には、洪水予測モデルの運用開始以降で年間データの揃っている3ヵ年(2021年~2023年)の観測水位データを用いた。

各年の観測データに対する交差検証(例えば、2022年のデータに対する検証を行う場合には、2022年を除く全データを学習させたモデルを構築し、学習していない2022年のデータに対する精度を評価)により、水系の対象全観測所の補填精度を検証した。精度検証結果(対象観測所の実績データと10分間隔で現時刻水位が欠測と仮定した場合の欠測補填結果)を図-5に例示する。いずれの地点においても、水位上昇の波形や平常時水位は再現精度が高いといえる。しかし、洪水時のピーク水位が低めに算出されており、この点については課題がある。これは、本検討で使用した2020年~2022年のデータ内に洪水が少なく、洪水時のデータに対する学習が十分でなかったためと考えられる。

以上を踏まえ、AI手法を用いた欠測補填方法の適用性について以下のとおり考察した。これらより、本検討においては、AI手法を用いた欠測補填は今後の継続検討が必要と判断し、一次選定からは除外することとした。

- AI手法による観測所水位の欠測補填は、洪水ピーク付近を除いて、一定の精度確保が望める有効な手法である。
- 洪水予測モデルとは別に、水系ごとに欠測補填モデルを作成する必要がある。また、当該モデルの実行に、前後処理を含めて1分程度の計算時間を要するため、水系によっては、洪水予測システム全体の10分ごとの演算処理が間に合わなくなる可能性がある。
- ピーク水位の再現性が不十分であったように、AI手法は、過去に経験した事象から今後発生する事象を予測する手法であるため、学習データ内に存在しない事象(既往最大を超える規模の洪水等)に対しては十分な精度を確保できないという課題がある。実用化に向けては、学習データの種別(水位、雨量など)の精査、平常時・洪水時の学習データ数のバランスの調整、モデルパラメータの調整等、各種設定条件を最適化する必要がある。

b) 欠測補填方法の一次選定

「①-3 過去の観測値および近傍観測所の観測値を使用する方法」に該当するAI手法を用いた補填方法は、前述のとおり、一次選定から除外した。

また、各水系の実際の欠測状況を分析した結果、各観測所

単独で欠測状態となる事例ばかりではなく、水系内の5割〜7割程度の観測所が同時に欠測(閉局を含む)する事例が多いことが確認された。このことから、「①-2 近傍観測所の観測値を使用する方法」に該当する上下流観測所の観測値との相関により補填する方法では、十分に欠測補填が機能しないことが考えられるため、一次選定から除外することとした。

以上を踏まえ、表-3の「一次選定結果」欄のとおり、現行システムへの実装に適していると考えられる欠測補填方法を一次選定した。

2) 欠測補填方法の最終選定

一次選定した欠測補填方法を対象に、意図的に欠測状況を発生させたシミュレーションを実施し、予測結果の精度を比較評価した(表-3の「シミュレーション結果」欄)。「①-1 過去の観測値を使用する方法」は、平水時、洪水立ち上がり時、洪水ピーク付近、水位低減時、のいずれかでは精度が良いものの、意図しない補填となる場合に著しく精度が低下することが懸念される。また、「③欠測補填せず、現時刻補正も実施しない方法」は、洪水予測モデルの精度に依存し、著しく精度が低下することが懸念される。

以上のことから、長時間欠測・閉局時にも安定的に予測演

表-3 現時刻観測値の欠測補填処理方法の一次選定結果と各選定手法の精度比較検討結果

欠測補填方法	計算イメージ	一次選定結果-理由	シミュレーション結果	最終選定結果
欠測無し (基本ケース)	-	-		-
①-1 過去の観測値を使用する方法		○ ・最もシンプルで分かりやすい。 ・洪水立ち上がり時に欠測が発生した場合、水位を過小評価してしまうおそれがある。		× 平水時以外は洪水波形を再現できない
①-1 過去の観測値を使用する方法		○ ・洪水立ち上がり時の過小評価を防ぐことができる。 ・水位の変化時に欠測が生じた場合、各時刻の水位変化量に応じて、現時刻の補正値が乱高下してしまう。		× 意図しない外挿が行われるパターンが多く、洪水波形を再現できない
① 観測値を使用する方法	①-2-1 上下流観測所の観測値から内挿補完する方法	×		-
①-2 近傍観測所の観測値を使用する方法	①-2-2 上下流観測所の観測値との相関係数から推定する方法	×		-
①-3 過去の観測値および近傍観測所の観測値を使用する方法	①-3-1 水系内の複数観測所の観測値からAIモデル(深層学習)を活用して推定する方法	×		-
② 計算値を使用する方法 (前時刻の10分後予測値を現時刻水位に適用する方法)		○ ・シンプルでわかりやすい。 ・観測値による担保が取れないため、予測モデルの再現性が低い地点では誤差が大きくなるおそれがある。		○ 前時刻の予測精度に依存するものの、全てのケースで概ね良好な欠測補填が可能である
③ 欠測補填せず、現時刻補正も実施しない方法		○ ・現行システムと同じ考え方である。		△ 現時刻補正なし計算の精度によって、大幅に予測値がずれるケースがあり得る

算ができ、かつ予測精度を著しく悪化させない方法として、「②計算値を使用する方法(前時刻の10分後予測値を現時刻水位に適用する方法)」を選択(表-3の「最終選定結果」欄)し、実稼働システムに導入した。

### 3. 精度や安定性の高レベル化に伴う計算負荷増大に対応した運用サーバ仕様の最適化

#### (1) 運用サーバの安定性に関する課題

水害リスクラインの洪水予測モデルについては、1.の観点以外の予測精度確保・予測信頼性向上の観点で、流出モデルの変更(土研分布型モデルからRRIモデルへの置き換え)が進められている。そのため、RRIモデルを搭載した洪水予測システムの次年度以降の導入に向けて、サーバ調達仕様の作成及びサーバ整備に係る概算費用の算定が必要とされた。一方、物理モデルであるRRIモデル<sup>4)</sup>は、概念モデルである土研分布型モデルよりも、解析負荷が大きく、演算時間を要することが知られている。しかし、検討時点(R4年度)において、RRIモデルを搭載した洪水予測システム(以降「新洪水予測システム」と言う)の導入事例が少なく、サーバ仕様の想定が難しい状況であった。このような中、新洪水予測システムの運用に必要なサーバスペックをどのように算定するかが課題であった。

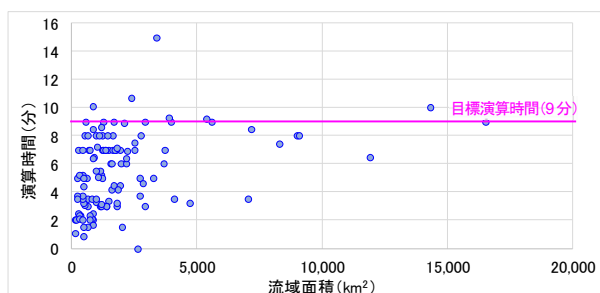


図-6 流域面積と洪水予測システムの演算時間の関係

表-4 サーバスペックとモデル規模の関係

項目	単位	No	山国川	川内川	備考
モデル諸元	流域面積	km <sup>2</sup>	①-1	540	1,600
	河道不定流モデル延長	km	①-2	51	177
	データ同化地点数	箇所	①-3	10	14
新モデル演算時間		分:秒	②	5:00	6:42
(実績)導入サーバ	CPUスロット数	スロット	③	72	72
	メモリ	GB	④	128	128
	リソース実効倍率	-	⑤	0.56	0.74 = ②/9.00(9分を基準)
実効サーバリソース	CPUスロット数	スロット	⑥	40	54 = ③ × ⑤
	メモリ	GB	⑦	71	95 = ④ × ⑤

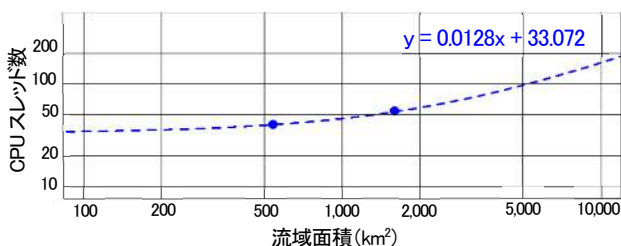


図-7 サーバスペックとモデル規模の関係係例

#### (2) 洪水予測に必要なサーバスペックの検討

新洪水予測システムの運用サーバのスペックを検討するため、全国一級水系の流域面積と洪水予測システム(以降「現行システム」と言う)の演算時間等の情報を収集・整理した(図-6)。大半の水系で演算時間は概ね9分以内であることから、これを新洪水予測システムの目標演算時間とした。

次に、RRIモデルを搭載した36時間洪水予測システムの先行導入事例(山国川水系、川内川水系)の運用実績を用いて、モデル規模と新洪水予測システムの運用サーバスペックの関係を検討した(表-4、図-7)。

モデル規模とサーバスペックの関係を、全国の一級河川に適用して、各水系の新洪水予測システムに必要なサーバスペックを算定した。算定したスペックに対し、以下の考え方で設定した安全率(1.3)を考慮し必要スペックを決定した。

- ・全国の現行システムにおける演算時間の余裕率(目標演算時間(9分)と10分ごとの実際の演算時間との比率)の最頻値は1.3程度である。
- ・可用性を向上するため、新洪水予測システムにおいても同程度の余裕時間を確保しておく必要がある。

なお、新洪水予測システムの演算時間に影響するモデル規模の指標として、流域面積、河道不定流モデル延長、データ同化地点数が考えられたため、それら3指標によりサーバスペックを算定した。このうち、演算時間に最も影響する結果となった「流域面積」を指標として算定したサーバスペックを採用した(表-5)。

#### (3) 新洪水予測システムの運用形態の検討

現行システムは、水系毎に準備された独立サーバで運用されており、実運用において、サーバスペックが不足または余剰となる事例が生じている。

以下に、現行システムの課題を示す。

- ・サーバ資源の活用が非効率となっている。また、サーバスペックの変更は困難な状況である。
- ・水系毎に独立サーバで運用されており、洪水予測システムが冗長化されていない。

現行システムの課題を踏まえ、新洪水予測システムの運用形態として、現行サーバ利用案、独立サーバ運用案、仮想サーバ運用案、クラウドサーバ運用案を立案した。実現性、安定性、コスト等の観点より、仮想サーバ運用案を最適案として採用した(表-6)。

表-5 新洪水予測システムのサーバスペックの算定

項目	CPU性能(スロット数)		メモリ性能(容量:GB)		備考
	必要数	安全率考慮	必要数	安全率考慮	
流域面積(km <sup>2</sup> )	7,008	9,110	12,470	16,210	採用
河道不定流モデル延長(km)	6,003	7,803	10,674	13,876	
データ同化地点数	6,808	8,851	12,104	15,735	

※全国の全一級水系の新洪水予測システムに必要なサーバスペック

表-6 運用形態(案)の評価結果

No	ケース名	概要	評価	採用
1	現行サーバ利用案	現行システムのサーバに、新洪水予測システムを導入	実現性× サーバリソースが不足	-
2	独立サーバ運用案	各地整に、水系毎の独立サーバを準備し、新洪水予測システムを導入 サーバ導入コスト:2,480百万円	実現性○、安定性○、コスト○ リソース調整の柔軟性× システム冗長化×	-
3	仮想サーバ運用案	各地整に、仮想サーバを準備し、各水系の新洪水予測システムを導入 サーバ導入コスト:3,340百万円	実現性○、安定性○、コスト○ リソース調整の柔軟性○ システム冗長化○	○
4	クラウドサーバ運用案	クラウドサーバを準備し、全国の洪水予測システムを導入 サーバ導入コスト:19,426百万円*	実現性○、安定性○、コスト× 他家と比べてコストが著しく高い	-

\*一般的なサーバの耐用年数を8年間と設定し、8年間のクラウド費用を算定

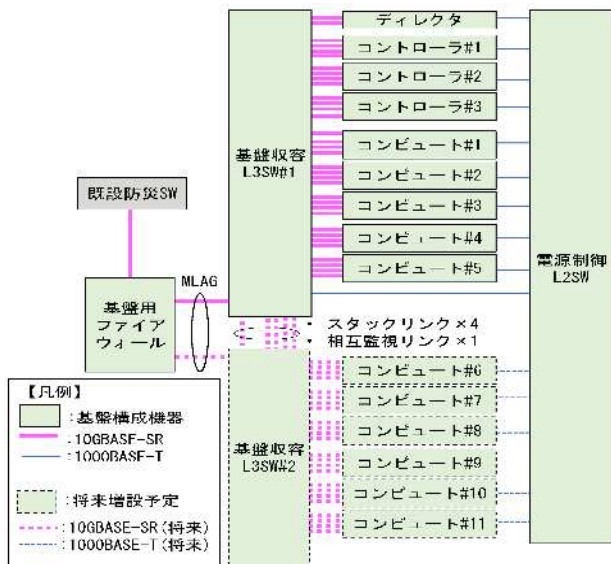


図-8 仮想基盤全体構成図(コンピュータHCIノード)

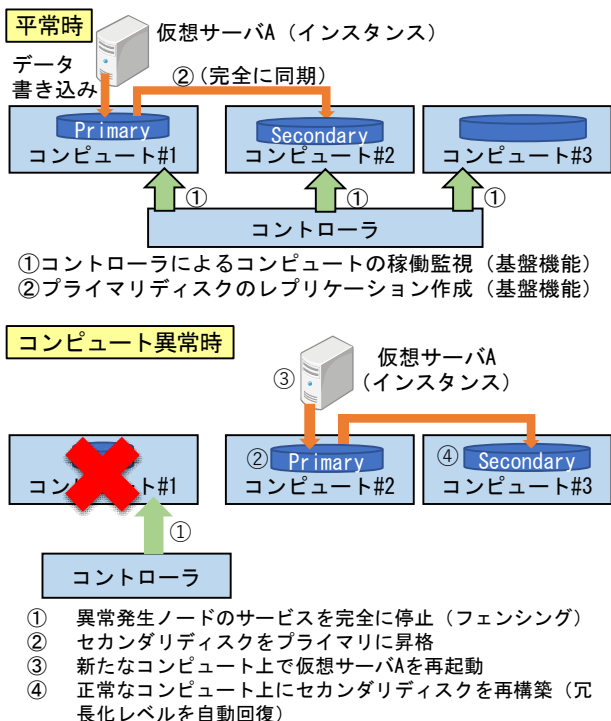


図-9 インスタンスHAの動作イメージ

(4) 洪水予測サーバ機器仕様の設定

以上の検討を踏まえて、以下に示す新洪水予測システム運用サーバの機器仕様を設定した。

- ・システム運用後の拡張性(サーバリソースの調整)、ハードウェア障害時の冗長性における優位性から、仮想サーバ方式を設定。
- ・サーバの仮想化技術として、段階施工による拡張が容易なHCI(Hyper-Converged Infrastructure)を採用(図-8)。HCIの導入により、サーバリソースが不足した場合の基盤拡張時の導入コストを大幅に削減。
- ・仮想サーバ用の冗長化対策として、基盤単独でも実施可能なHAクラスタ(図-9)の導入を提案。
- ・各水系の新洪水予測システムの実質的な必要サーバスペックが不確定なため、仮値で設定。サーバ導入に当たっては、HCIによる仮想サーバ構成を最小限で立ち上げ、その環境で各水系の必要スペックを確認したのち、実質的な必要台数を検討する必要があるため、その具体的な手順を整理。

あとがき

線状降水帯や台風規模の拡大化等の影響により、関係機関や住民に向けた、精度の高い水災害リスク予測の発信、伝達の重要性がますます高まっている。

本検討では、「水害リスクライン」の精度や安定性を高いレベルで確保するため、予測精度の定量的な総合評価方法、長時間欠測時の適切な補填方法を確立し、整備局管内での実用化に繋がった。高い評価を受けたこれらの成果は、全国の整備局に展開・導入されることが期待される。また、サーバ仕様については、本検討の成果が全国的に共有され、各整備局におけるサーバ整備の基礎資料として活用されている。

「水害リスクライン」の検討・構築・運用は、今後、自治体管理の二級水系でも進められる見通しであり、本検討の成果は、これらへの適用が強く望まれるところである。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所:洪水予測システムのチェックリスト(案),平成22年5月
- 2) 児島利治・Weilisi・大橋慶介:深層学習による流量欠測値の補完方法の検討,河川技術論文集,第6巻,令和2年6月
- 3) 田村和則・加納茂紀・三浦心・山脇正嗣・金子拓史:ダム流入量長時間予測への浸水学習の適用-ダム防災操作の効率化を目指して-,土木学会論文集 B1(水工学)Vol.74, No.5,平成30年5月
- 4) 水災害・リスクマネジメント国際センター(ICCHARM)・国立研究開発法人土木研究所(PWRI)・佐山敬洋(京都大学防災研究所):RRI Model User's Manual ver.1.4.2.5,令和3年9月