

不確実性を持つ長時間洪水予測システムの開発

-SIP2期「スーパー台風被害予測システムの開発」の取り組みと進捗-

北 真人¹・銭 潮潮²・此島 健男子¹・中安 正晃³・辻本 哲郎⁴

¹(一財)河川情報センター 河川情報研究所 研究第3部研究員

²(一財)河川情報センター 河川情報研究所 研究第3部主任研究員

³(一財)河川情報センター 河川情報研究所 研究第3部長

⁴(一財)河川情報センター 河川情報研究所 所長

本論文では、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)のプロジェクトの一部である「長時間洪水予測システム」開発の進捗状況について報告する。本システムはアンサンブル予測雨量データを活用した不確実性を考慮した長時間先の洪水予測を行う。検証計算では、令和元年の台風19号時の河川水位変化の特徴を良好に補足するとともに長時間先の予測の有効性を示した。また、不確実性を持つ情報の分かりやすい提供方法について検討した。今後はシステム改良やSIPにおける他テーマとの連携を行うとともに、開発期間終了後にはの全国一級水系へのシステム展開を目指す。

Key Words : 長時間洪水予測, アンサンブル雨量予測, スーパー台風, SIP, 社会実装

1. はじめに

気候変動に伴い、近年では風水害の激甚化が問題となっており、今後もその傾向が顕著になる可能性が見込まれる。そのため、国民の人命を守るための避難行動を支援する技術は国全体としても喫緊の課題である。内閣府「総合科学技術・イノベーション会議」の主導の下、府省・分野横断的な取り組みであり、かつ、基礎研究から実用化・事業化までを一貫通貫で行う「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP：cross-ministerial Strategic Innovation promotion Program）¹⁾」（以下、SIPとする）が展開されている。SIPの課題のうち、「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」は上述した避難行動の支援や早期経済復旧を目的として、国や市町村の意思決定の支援を最先端技術によって実現するものであり、7つの研究テーマが設定されている。

7つの研究テーマの一つとして気候変動の進展に伴い発生が予想されるスーパー台風襲来時の被害予測と治水施設の有効活用によって逃げ遅れゼロ、社会経済被害最小化の実現を目的とする「スーパー台風被害予測システムの開発」（研究開発機関：京都大学、研究責任者：立川康人）がある。さらに、本テーマは「高波・高潮ハザード予測」、「河川・ダム」の長時間洪水予測・防災支援システム」、「危機管理型水門管理システム」の3つのシステムで構成されている。その中で、（一財）河川情報センターでは「河川・ダム」の長時間洪水予測・防災支援システム」の開発に共同研究機関として参画し、（独法）水資源機構と共同で事務局を担当している。本稿では、主として本システムのうち当センターが主

体となって取り組んでいる「長時間洪水予測システムの開発」の概要と進捗状況を報告するものである。

2. 研究開発の概要と長時間洪水予測の必要性

(1) 河川・ダムの長時間洪水予測・防災支援システムの研究開発概要

本節では、上記システムの特徴について現状の洪水予測技術と比較しながらその概説する（図-1）。本システムは「長時間洪水予測システム」、「広域洪水予測システム」、「統合ダム防災支援システム」の3つで構成される。現在、国土交通省で運用されている「水害リスクライン²⁾」では、一級水系の本川と河道断面データがある支川区間（以下、幹川とする）を対象として、自治体や河川管理者向けに6時間先までの洪水予測情報を提供している。しかし、後述するように6時間先までの予測は多くの人口を有する地域の住民が広域避難を行うには不十分である。一方、決定論的な予測モデルを用いた長時間の降雨予測情報を入力データとした場合、長時間先の水位の予測精度が落ちることが懸念される。そのため、「長時間洪水予測システム」では長時間先（72時間）のアンサンブル降雨予測情報を活用した長時間洪水予測システムを構築し、その幅を持った予測情報を活用した広域避難行動の意思決定を支援する技術開発を行うものである。

なお、「広域洪水予測システム」は、全国を対象としたRRI（Rainfall(降雨)-Runoff(流出)-Inundation（氾濫））モデル³⁾を構築し、俯瞰的な洪水予測を行うものである。この際、山崎ら⁴⁾によって開発された高解像度水文地形データを河道データとして用

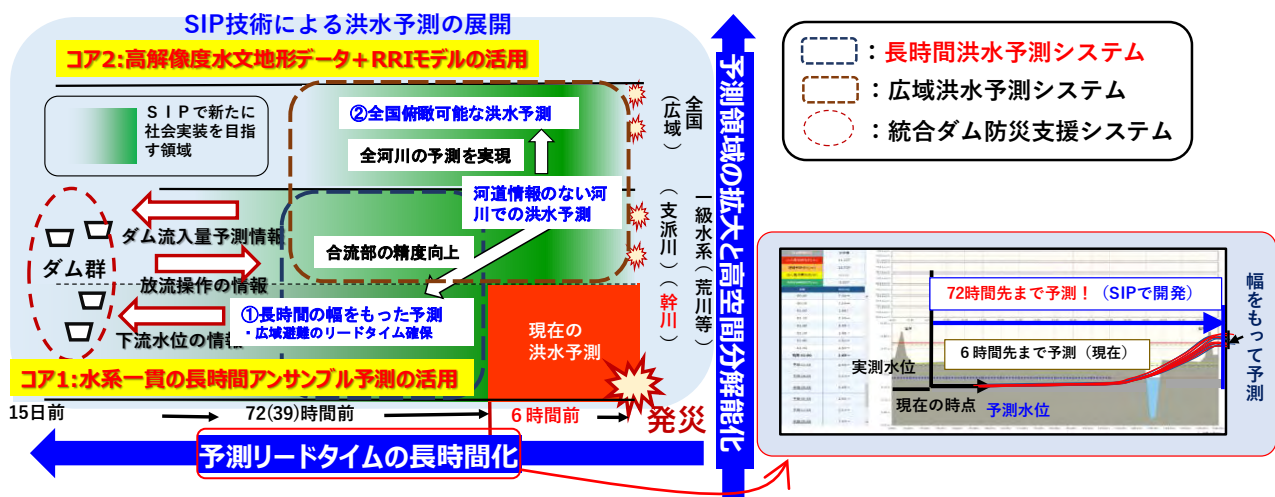


図-1 河川・ダムの高時間洪水・防災支援システムの概念図

いることで、今まで河道データが存在しなかった区間も網羅した予測を実現している。さらに、「広域洪水予測システム」で構築されたRRIモデルを「長時間洪水予測システム」へ適用することによって、河道データが無いために、従来、予測が行われていなかった中小河川（以下、中小河川とする）についても詳細な予測が実現可能となる（モデルの概要は後述する）。

「統合ダム防災支援システム」は、15日先のアンサンブル予測雨量を活用し、ダム群の放流操作の最適化を行うシステムである。この操作情報と上記2つの洪水予測システムを連携させることで下流域の河川災害軽減を実現するダム操作の技術開発を目指す。以降、「長時間洪水予測システム」に関する技術開発について述べる。

(2) 長時間洪水予測の必要性

本節では、長時間予測の必要性について荒川下流域での避難行動の実態を事例に挙げて述べる。荒川下流域に位置する江東5区は低平地であり、下流域で氾濫が発生した場合には氾濫域が広範囲に拡がることに加えて、浸水継続時間も長期に渡ることが危惧されている。さらに、想定最大規模の浸水域では人口約250万人が居住しており、これらの人々が広域的に避難するには早い段階で避難行動をとる必要がある。江東5区では「江東5区広域避難推進協議会」を設置し、72時間前までのタイムラインを策定している⁵⁾。その一方で、そのタイムラインにおける避難行動を起こすトリガーとしての予測情報は雨量のみであり、災害に直結する河川水位の予測情報は用いられていない。しかし、例えば、令和元年の台風19号においては、荒川本川の基準水位が氾濫危険水位を超過したが、72時間流域平均雨量は443 mmと広域避難勧告を行う基準値（約600 mm）を下回るものであるなど、雨量のみを指標として氾濫発生危険度を判定するのは困難な場合がある。このため、長時間先の水位予測情報を用いることで、より適切な避難行動の意思決定を支援することができ

る。また、荒川流域のみならず低平地に多くの人口を抱える大都市（大阪、名古屋）でも同様な課題を有している。

長時間洪水予測を行う上での問題点として、入力データとなる予測雨量の誤差が、予測時間の長くなるに伴い増大することが挙げられる。その結果、長時間先の洪水予測の精度が低下することが危惧される。その対策として、適度に初期値をばらつかせた上で雨量予測の数値モデルを複数走らせ、様々な予測結果を得る「アンサンブル雨量予測」を活用する。アンサンブル雨量予測では、様々な予測可能性を網羅することが可能となり、実現に近い状態を予測する結果も現れる可能性がある。これを洪水予測の入力データとすることで、長時間先においてもその不確実性を持った予測が実現可能である。

3. プロトタイプ洪水予測モデルの構築と検証

SIPでは、上述したような課題を抱える荒川流域を対象に洪水予測モデルを構築した。本章では構築したモデルの概要と台風19号を対象とした検証結果について述べる。

(1) モデル概要

図-2にモデルの概念図を示す。今回SIPで構築したモデル（以下、SIPモデルとする）は既往の洪水予測モデル⁶⁾（以下、既往モデルとする）をベースに構築した。両モデルとも幹川区間での水位・流量計算を行う1次元不定流モデル、中小河川の水位・流量や河道への流出を計算する流出モデルで構成される。大きな改良点としては、既往モデルでは流出計算や中小河川の河道計算の部分において土研型分布流出モデルが用いられているのに対し、SIPモデルではRRIモデルを用いて流出計算や中小河川の計算を行ったため、河道断面が得られない区間の水位・流量が予測可能となる点が挙げられる。

RRIモデルは、降雨・流出・氾濫過程を一体的に解くモデルであり、斜面での流出や氾濫を2次元、

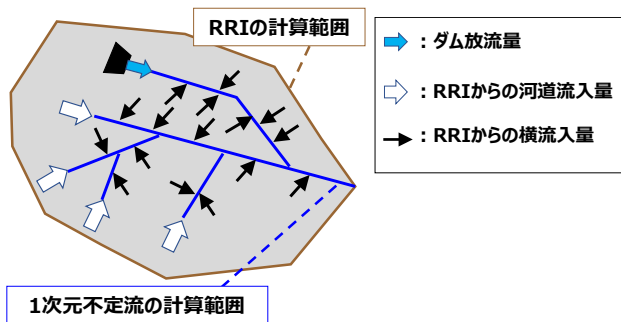


図-2 SIP モデルの概念図

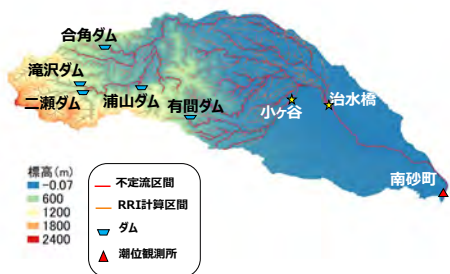


図-3 計算領域

河道計算を1次元のdiffusion wave法によって解き、水面勾配によって水の流れが支配される。土研型分布流出モデルでは、流出や河道計算は1次元のkinematic wave法で解かれるため、斜面地形や河道の勾配のみで水の流れが支配される。この違いによって、流出過程や河道追跡をより物理的に整合性の取れた形で表現することがRRIでは可能となる。さらに、氾濫過程も考慮することで、一層正確な水位・流量の推定が可能とされる。

(2) 計算条件

荒川にスーパー台風に準ずる規模の台風が襲来した例として、台風19号を対象として検証計算を行った。表-1に計算条件を、図-3に計算領域を示す。計算開始時間は助走期間も考慮して2019年10月8日0時とし、終了時刻は同年同月13日6時とした。中小河川部（RRI）の解像度は「広域洪水予測モデル」をベースとしていることから150 mメッシュとした。また、入力降雨はC-bandオンライン合成雨量データを用いた。計算領域については、既往モデルと同様に治水橋地点上流のみで流出および支川の河道計算を行った。なお、パラメータについては鉛直浸透が支配的となる畑地では鉛直飽和透水係数を設定し、側方からの雨水浸透が支配的となる山地部では側方飽和透水係数を設定している。

幹川部（1次元不定流）では計算解像度は河道断面データが存在する200 mピッチとし、計算時間は中小河川部と統一した。境界条件については、中小河川からの横流入およびダムが存在しない上流端では中小河川部での計算流量を与えた。また、図-3に示すように5つのダム（滝沢、二瀬、合角、浦山、有間）が存在している上流端ではそれぞれの実績放流量を、下流端境界条件としては荒川河口部にある南砂町地点の実績潮位データを与えた。

表-1 計算条件（検証計算）

中小河川部（RRI）			
計算時間	2019/10/8 0:00 - 2019/10/13 6:00		
格子サイズ(度)	0.00139(約150 m)		
タイムステップ(秒)	60		
入力降雨			
C-band オンライン合成雨量			
パラメーター			
河道粗度 (m ^{-1/3} /s)	0.03		
	畑地	山地	都市
斜面粗度 (m ^{-1/3} /s)	0.4	0.4	0.4
土層圧 (m)	1.0	1.0	1.0
間隙率	0.471	0.471	0.471
鉛直飽和透水係数 (10 ⁻⁷ m/s)	5.56	-	-
側方飽和透水係数 (m/s)	-	0.03	-
本川部（1次元不定流）			
計算時間	2019/10/8 0:00 - 2019/10/13 6:00		
計算解像度 (m)	200		
タイムステップ(秒)	0.5		
境界条件			
側方境界（横流入）	RRIモデル出力		
上流端境界	RRI出力 or ダム放流量（下記5地点）		
下流端境界	実績潮位（南砂町）		

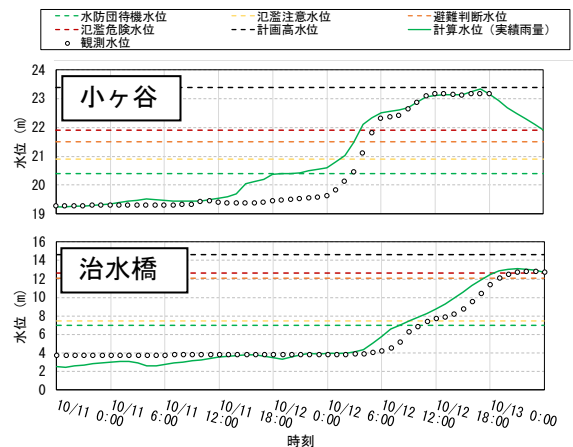


図-4 水位ハイドログラフ（上：小ヶ谷，下：治水橋，2019年10月11日0時-2019年10月13日6時）

(3) 計算結果

図-4に計算結果および観測水位のハイドログラフを示す。小ヶ谷、治水橋の位置関係は図-3を参照されたい。なお、表示時刻は11日0時からとする。図より、支川入間川（幹川部）の小ヶ谷地点（図-4上）では観測値（図中白抜き丸）が12日11時付近に氾濫危険水位を超過し、12日18時で計画高水位に迫る値を示している。なお、13日0時以降の観測水位は欠測となっている。一方で、計算値（図中緑実線）では水位の立ち上がりが観測値と比較して12時間程度早くなっているが、ピーク水位やその時刻、継続時間は概ね良好に捉えている。次に、本川である治水橋地点（図-4下）では、観測値が13日0時付近で氾濫危険水位を超過している。計算値では、小ヶ谷地点と同様に水位の立ち上がりの時刻が早くなっているが、そのずれは小さくなっている。また、治水橋地点でもピーク水位、ピーク時刻ともに良好に再現できていることが分かる。

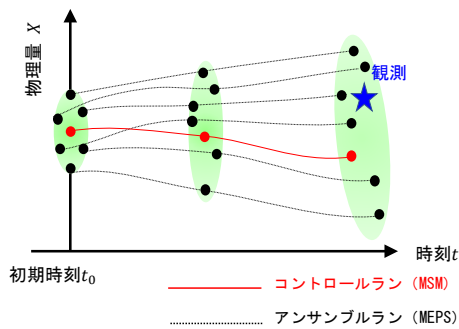


図-5 アンサンブル予測の概念図

表-3 MEPS 仕様

モデル名	メソアンサンブル予測システム
空間解像度	5 km
時間解像度	6時間
予報時間	39時間
計算領域	日本全域
アンサンブルメンバー	21

以上のことから、構築したSIPモデルにおいて良好に水位を再現可能であることが分かった。しかしながら、立ち上がりが早い傾向が見られることからパラメータ調整等を検討する必要がある。また、対象が台風19号のみであるため事例を増やした上での検討も必要であると考える。

4. アンサンブル予測雨量を使った長時間洪水予測の検討

(1) アンサンブル予測雨量の概念

本節では長時間洪水予測システムの入力データとなるアンサンブル予測雨量の基礎概念について説明する。一般に長時間先の雨量予測の精度は低下する傾向がある。それは、数値モデルが持つ初期値鋭敏性に起因し、与える初期値の誤差によって雨の発生に影響を及ぼす物理量（風、気温、水蒸気量など）の予測誤差が増大することが原因である。そこで、気象分野で目覚ましい発展を遂げているアンサンブル予測を活用する。これは計算初期時刻の物理量に適当なばらつきを持った変動量（初期摂動）を付加した上で複数の予測を行うものである（図-5）。

この手法によって、コントロールラン（単一予報）で得られる予測結果が観測値から離れていてもアンサンブルランのどれかが観測に近い値を示すなど予測の可能性を網羅することが可能となる。

(2) 初期摂動の作成方法

前節で説明したように、アンサンブル予測を行う上で初期摂動の作成が必要となる。かつては、物理量に対してある程度の大きさの初期摂動をランダムに与えていたが、物理的な整合性の面もあり現在は用いられていない。近年では、数値モデルベースで摂動を作成する方法が主流である。表-2に代表的な初期摂動の作成方法を示す。詳細は参考文献⁷⁾を参照にされたいが、基本的にはモデルの中で誤差を時

表-2 初期摂動の作成法（代表例）⁴⁾

手法名	概要	適用モデル例
時間ずらし法	計算開始時刻が異なり、終了時刻が同じ複数の計算を行うことで摂動を作成。終了時刻が予測開始時刻となる。	-
BGM法	誤差をモデルの中で成長させて摂動を作成する方法。その繰り返しによって成長率の高い摂動を作成する。	1ヶ月EPS
SV法	接線形方程式と随伴方程式を用いることで最も成長モードが大きい摂動を計算する。	MEPS他

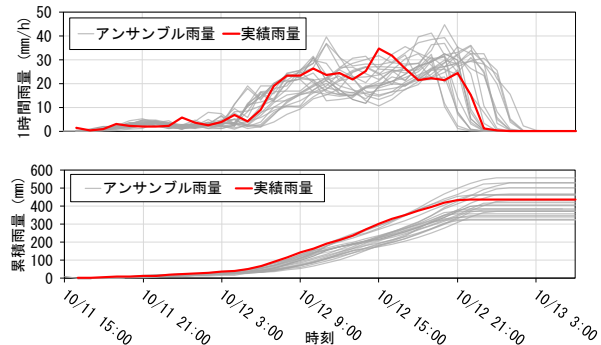


図-6 MEPS 流域平均雨量（上：1時間雨量，下：累積雨量，2019年10月11日15時-2019年10月13日6時）

間発展させるもの（時間ずらし法、BGM法）と接線形モデルと随伴モデルを用いて時間発展による成長率が高い摂動を計算するもの（SV法）に分けられる。本稿で対象とするメソアンサンブル予測システム（MEPS）はSV法により初期摂動が作成される。

(3) メソアンサンブル予報システム（MEPS）

本節では、アンサンブル洪水予測に用いるメソアンサンブル予報システム（以降、MEPSとする）について説明する。MEPSは令和元年6月から本運用が開始されたアンサンブル予報システムである。現業運用されているメソスケールモデル（以降、MSMとする）をアンサンブル化したものであり、空間解像度は5 km、アンサンブルメンバーは21メンバーとなっている（表-3）。空間解像度の細かさから、流域の流出計算も適用可能なものとなっている。

図-6に台風19号時のMEPSのアンサンブル予測雨量を示す（2019年11月15日15時から2019年10月13日6時）。図中灰色線がアンサンブル予測結果（21メンバー）、赤線が実績雨量となっている。予測および実績雨量は治水橋地点上流部の流域平均となっている。図より、一部の時刻を除いて、1時間雨量および累積雨量ともにアンサンブルメンバーの中に実績雨量が包含されていることが分かる。このことは、アンサンブル予測が実際の現象の予測可能性を適切に網羅していることを意味している。

以上より、MEPSでは台風19号による降雨を適切に幅を持って予測できていたことを示している。

(4) 台風19号を対象としたアンサンブル洪水予測

本節では、MEPSを入力データとして前章で構築した洪水予測モデルを用いたアンサンブル洪水予測を行った。計算条件は表-1と同一とした。ただし、

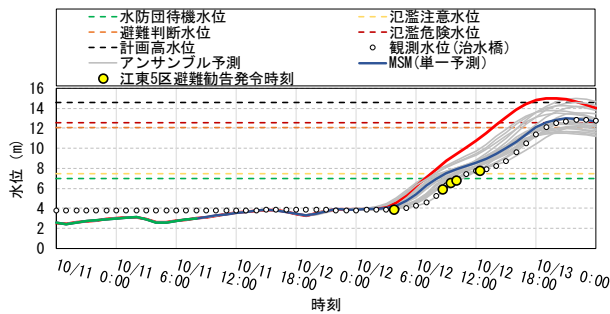


図-7 アンサンブル水位ハイドログラフ（治水橋，2019年10月11日15時-2019年10月13日6時）

11日15時からMEPSを入力データとして与えてそれ以降はアンサンブル予測とした．図-7に予測結果を示す．図より，アンサンブル予測でも検証計算と同様に，観測値よりも水位の立ち上がりが早いものの洪水波形を包含していることが分かる．さらに，ピーク水位に着目するとアンサンブル予測の幅に観測ピーク水位が包含されていることが分かる．このことは，災害が発生する危険な状態を適切に捕捉していることを意味している．この理由として，図-6に示したMEPSのハイドログラフ（計算でも同期間の雨量を入力としている）においても，概ね良好に観測雨量を捉えていたことが理由として挙げられる．また，最も危険なピーク水位を予測したメンバーを赤実線で示したが，計画高水位を超過している．江東5区では，図中黄色丸で示す時刻で通常の広域ではない避難勧告を発令していたが，一番早い発令時刻は江戸川区で12日9時45分であった．今回構築したモデルを用いた場合では，氾濫危険水位を超過する可能性が11日15時時点には分かっていたこととなり，より早期の避難勧告が実現する可能性があることが示唆された．

以上より，今回構築したモデルのアンサンブル予測の有効性を，江東5区の避難行動の実態の面からも示すことができた．

(5) 不確実性を含む予測情報の分かりやすい表示系の検討

従来の洪水予測では幅を持った予測情報の提供が行われておらず，ユーザー（主に住民避難の責を担う地方自治体）に対して，このような情報を利用しやすい形で伝達する必要がある．そこで，SIPでは洪水予測システムの開発に加えて，予測情報の提供手法についても検討を進めている．一例として，図-9に地点水位の予測結果の表示例を示す．特徴として，図中の①のように予測水位の上限下限およびアンサンブル平均を表示する．②ではいつ基準水位を超過するかをアンサンブルメンバーの割合で定量的に示し，色分け表示をする．③では最高水位の分布を箱ひげ図で表示し，予測期間中に基準水位を超過する見込みを図示する．これらのように幅を持った情報を視覚的に受け取り易い形に変換する．

これらの情報を基に，少しでも災害発生の危険性（氾濫危険水位超過）があれば，資機材の準備や交

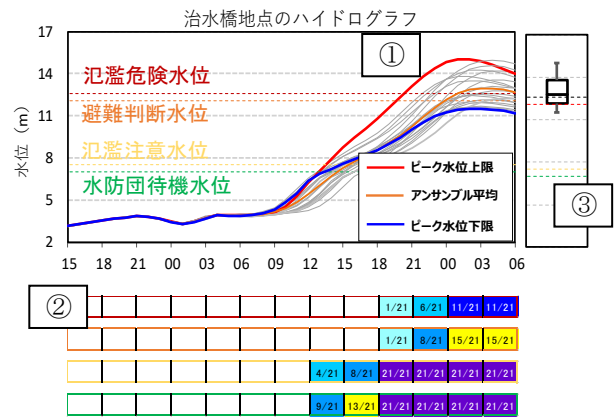


図-8 アンサンブル地点水位予測情報の表示例



図-9 アンサンブル予測水位の平面表示例

通規制情報の収集など空振りによって生じるコストの小さな場合や，鉄道車両の避難など万一被災した際のリスクが極めて大きな場合について行動をとる．また，一定の危険性が見込まれる場合に，広域避難勧告等の周囲への影響が大きい決定の判断を下すなどといった活用例が想定される．このように，不確実性を付加した情報を活用し，発災の可能性を示すことにより柔軟な避難行動の意思決定を支援することに取り組んでいる．また，図-9に示すように，①各メンバーのピーク水位を包絡，②基準水位毎の超過確率を平面的に表示することで流域内の危険度の俯瞰的な表示手法についても検討している．

4. 今後の展開

(1) オンライン化とシステムの改良

今回構築した長時間洪水予測モデルは，本年度中にオンライン化し，入力データの取得，予測計算，計算結果の変換，情報提供までが自動化される予定である．情報の提供先としては，当面，江東5区，荒川下流河川事務所，東京都等を想定している．

同時に，モデルの改良も推進する．前述したように，現在のSIPモデルでは，RRIで計算した支川流量を一方向的に本川に流している状態である．本川水位が高くなることで発生するバックウォーター現象の再現などを目的に，本川の水位予測結果をRRIモデルの下流端条件として設定できるよう改良する．

表示系については，今年度実施予定の江東5区の避難ワークショップに本モデルの予測結果を提供し，実際に情報を活用する自治体の方々の意見を聴取・反映することで，避難行動の実態に沿った表示仕様への改良へとつなげていく．

(2) SIPの他テーマとの連携

SIPでは、テーマ間のデータ連携を行うことで、より一層の効果増進を目指すこととしており、図-10に示す形で「スーパー台風被害予測システム」内および他テーマ間のデータ連携の検討を進めている。

長時間洪水予測システムは、広域洪水予測システムと技術的にも密接な関係にあるが、さらに、高潮・高波ハザード予測システムから下流端の出発水位を、統合ダム防災支援システムからダムの最適操作を踏まえたダム放流量を受け取ることで、予測の精度を向上させることが可能となる。

さらに、本システムが提供する情報は、テーマVIIの地方自治体の危険度判定の支援や、衛星で氾濫域を観測するテーマIIの衛星操作トリガーとしても活用が期待されている。

(3) 社会実装に向けて

現在、長時間洪水予測のモデルケースとして荒川を対象にシステム構築を目指しているが、洪水の予測情報は住民の生命や財産に直結するものであり、実際に自治体等に利活用していただくには、法的な責任を伴う形での提供が必須となる。

また、長時間洪水予測に対するニーズは、大都市を擁する荒川以外の水系の自治体や公共交通機関などにも共通するものである。

全国の大河川を管理している国土交通省は「水害リスクライン」などの情報提供システムを開発・運用して、河川の危険性に関する情報の提供に取り組んでいる。このため、本研究の成果について、今後、国土交通省などの河川管理者に承継された上で、幅広く利活用されていくことが望ましいと考えられる。

6. まとめ

本稿では、SIPで開発中の「長時間洪水予測システムの開発」についての進捗や取り組みについて報告を行った。進捗として、台風19号を対象とした検証において不確実性を有する長時間先の洪水予測の有効性を示し、分かりやすい表示系について検討を

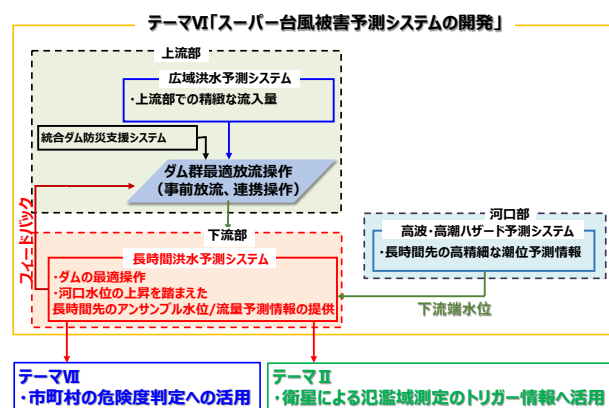


図-10 SIPにおけるテーマ間連携

行った。また、今後はモデルの改良や、SIPの特徴を十分に活かしたテーマ間連携を行うとともに、全国展開へ向けた技術開発も推進していく予定である。

謝辞：本研究は、内閣府 戦略的イノベーションプログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理法人：防災科研）によって実施されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府：戦略的イノベーション創造プログラム（SIP：エスアイピー），<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/>
- 2) 国土交通省：水害リスクライン，<https://frrl.river.go.jp/>
- 3) 佐山敬洋，藤岡奨，牛山朋来，建部祐哉，深見和彦：インダス川全流域を対象とした2010年パキスタン洪水の降雨流出氾濫解析，土木学会論文集B1（水工学），68巻4号，I_493-I_498，2010。
- 4) 山崎大，富樫冨佳，竹島滉，佐山敬洋：日本全域高解像度の表面流向データ整備，土木学会論文集B1（水工学），75巻5号，I_163-I_168，2018。
- 5) 江東5区広域避難推進協議会：江東5区大規模水害広域避難計画，https://www.city.edogawa.tokyo.jp/documents/10884/koto5_main.pdf
- 6) 河川財団：第1回 河川研究セミナー「新しい洪水予測手法；水害リスクライン」，2019。
- 7) 日本気象学会：アンサンブル予報，気象研究ノート，第201号，pp.105-109，2002。

Developmen of long term flood prediction system considering uncertainty
- SIP 2nd stage “development of damage prediction system for super typhoon ” -
Masato KITA, Chaochao QIAN, Takehiko KONOSHIMA, Masaaki NAKAYASU
and Tetsuro TSUJIMOTO

SIP (Cross-ministerial Stratagic Innovation Promotion Program) promotes the research project for prediction of hazard and evacuation activity as one of the several programs. This paper reports the development of long term flood prediction system included in this project. In order to enhance the accuracy of flood prediction, the authors of this papaer developed new numerical model (SIP model) consisting of 1-D unsteady flow model and RRI (Rainfall-Runoff-Inundation) model. The SIP model using ensemble rainfall prediction data can adequately capture the peak water level and indicate the potency of long term flood prediction. Moreover, we discuss the easy-to-understand display method for prediction results considering uncertainty.

Finally, the authors indicate the future plan (modification of prediction system, collaboration with other system, nationwide expansion of the system).