

2016年北海道豪雨災害を対象としたアンサンブル気象予測を用いた氾濫リスクの予測可能性

Predictability of Flood Risk Using Ensemble Weather Forecast for 2016 Hokkaido Heavy Rainfall Disaster

北海道大学大学院工学院	○学生員	イザーズ ハズミー
北海道大学大学院工学研究院	正員	山田 朋人
北海道大学大学院工学研究院	正員	久加 朋子
北海道大学大学院工学研究院	フェロー	清水 康行
北海道大学大学院工学院	学生員	奥田 醇
北海道大学大学院工学研究院	正員	星野 剛

1. はじめに

2016年、台風10号の接近により、北海道の日高山脈や周辺域において記録的な大雨が降り、石狩川水系石狩川支流の一级河川である空知川の上流域にある南富良野にて、堤防からの越水と破堤による氾濫被害が発生した¹⁾。

Nguyen-Le and Yamada²⁾は領域気象モデルを用いた検討により、同台風10号による災害発生のおおよそ二日前の時点では、台風の経路に関して高い予測可能性を有していると述べた。小林ら³⁾はそれらのアンサンブル気象予測がもたらす降雨量及びピーク流量の不確実性を評価した結果、ピーク流量はアンサンブルメンバー間で170 m³/s 程度(ピーク流量の %程度)の不確実性を有するとの結果を得た。また、小林ら³⁾は気象予測が与え

る河川流量の不確実性よりも降雨観測位置をどこに選点するかによる降雨強度の幅(ばらつき)が河川流量にもたらす不確実性が大きいことがわかった。一方で、奥田ら⁴⁾は河川の流れと氾濫に関する数値計算から氾濫の特徴として堤防からの越水により破堤し、同河川の旧河道に沿って氾濫水が流下した過程と説明した。このような個別の解析がなされている一方で、気象予測から、降雨流出、洪水氾濫までの一連の解析をどのように取りまとめて、評価するかという方法は確立されていない。

本研究ではこのような氾濫被害の予測可能性を調べることを目的に領域気象モデル、降雨流出モデル、河川・氾濫モデルを連続的(シームレス)に用いることにより、災害発生の二日前を予測の初期時刻として、台風を含む気象場のアンサンブル予測を実施し、得られた降雨から河川流量、河川水位、河床変動及び氾濫形態の予測可能性及び不確実性を調べた。また、このような確率的な被害予測に基づくことで、数日前からのリスクベースの避難行動や緊急対応の判断指標となり得ることを示した。

2. 使用したモデル・実験方法

2.1. 使用したモデル・実験方法

Nguyen-Le and Yamada²⁾は8月28日18:00(UTC)の時点(災害の二日前)を初期状態とし、台風を含む気象場の予測を行なった。用いた領域気象モデルはAdvanced Research of the Weather Research and Forecastである。また、同計算の初期値には米国国立環境予測センターのThe GFS Global Ensembleを境界値および初期値として用い、21アンサンブルメンバーの計算を実施した。モデルの物理過程や計算の対象範囲などの計算条件については文献²⁾を参照されたい。同アンサンブル予測による台風経路と気象庁ベストトラックを図-1に示す。

2.2. 降雨流出モデル

次に、各アンサンブル予測から得られた降雨量に対して流出解析により河川流量を求めた。図-2に空知川上流

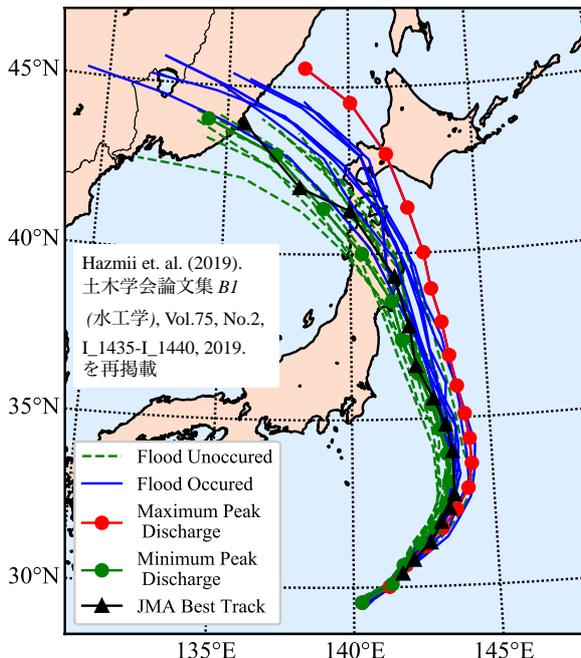


図-1：二日前予測の台風の経路²⁾、○はJMAベストトラック、△はアンサンブル最大ピーク流量、緑破線と青実線はそれぞれ氾濫が発生しない事例と氾濫が発生した事例として加筆した。

域の流域平均降雨強度および小林ら³⁾の流出計算結果を示す。降雨流出計算に用いられたモデルは吉見ら⁵⁾の鉛直浸透機構と斜面計算を分離した2段3層のモデルである。この流出計算手法は、降雨が流出に寄与する遅れ時間や損失雨量を表現することができる。流出パラメータは解析雨量を用いた空知川上流域における流域平均雨量や幾寅水位観測所の12km下流にある金山ダムの流入データを用いて推定された。モデルの詳細については文献^{3,5)}を参照されたい。

2.3. 川の流れ・氾濫解析の条件

本研究では河川の流れおよび氾濫のシミュレーションにiRICのNays2DHモデル⁷⁾を用いた。計算条件は奥田ら⁴⁾と同様の設定とした。上流端の流量には小林ら³⁾の流出計算結果の21アンサンブルを用い、各アンサンブルの河川流量より得られる河川水位、河床変動及び氾濫形態について調べた。なお、計算条件の詳細は文献⁴⁾を参照されたい^{7),8)}。

3. 実験・解析の結果

3.1. 降雨流出計算

表-1は気象予測アンサンブル計算結果からアンサンブル事例の最小ピーク流量（以降、 $EnsQ_{min_nf}$ ）、越水・氾濫しないアンサンブル事例の最大ピーク流量（以降、 $EnsQ_{max_nf}$ ）、越水したアンサンブル事例の最小ピーク流量（以降、 $EnsQ_{min_f}$ ）、アンサンブル事例の最大ピーク流量（以降、 $EnsQ_{max_f}$ ）を示す。また、降雨・流量の観測データ及び北海道開発局が推定したピーク流量を示す。 $EnsQ_{max_f}$ の総雨量は解析雨量より小さいが、ピーク流量およびピーク降雨量は一番大きい。さらに、 $EnsQ_{max_nf}$ のピーク降雨量は $EnsQ_{min_f}$ より大きいが、氾濫が生じず、総雨量およびピーク降雨量のみから氾濫の発生を予測するのは難しいことが分かった。

図-2は気象予測モデルの結果を用いたハイドロ・ハイト

表-1：アンサンブル事例及び比較対象の観測データのピーク流量、ピーク降雨量及び48時間総雨量、48hr総雨量[mm]の期間は2016年8月30日午前1時から9月1日午前1時までである。解析雨量とはレーダーアメダス解析雨量の流域平均降雨強度である。

	ピーク流量 m ³ /hr	ピーク流量 mm/hr	ピーク流量 Mm
$Ens Q_{min_nf}$	974.6	14.3	175
$Ens Q_{max_nf}$	1218	19.3	179
$Ens Q_{min_f}$	1227	18.9	188
$Ens Q_{max_f}$	1736	37.4	208
$Ens Q_{rmax}$	1427	21.4	229
解析雨量	-	20.8	224
金山ダム	1556	-	-
幾寅地点 観測所	1143	-	-
北海道開発局 流出計算結果	1390	-	-

エトグラフを示す。北海道開発局の流出計算結果⁴⁾は全アンサンブル流量の平均より1 σ （標準偏差）以上に位置しており、実際の洪水のピーク流量も本アンサンブル予測でカバーしていることがわかる。また、 $EnsQ_{max_f}$ の流量ハイドログラフは他のアンサンブル及び北海道開発局⁴⁾の流出計算結果と比較すると形が異なっている。 $EnsQ_{max_f}$ の流量ハイドログラフの形は8月30日には流量は大きく上昇しないが、8月31日に急激に流量が増大する。この事例ではより短い時間に降雨が流下した一方で、他のアンサンブル及び北海道開発局のハイドログラフの形は8月30日から徐々に上昇し、また緩やかに下降する形となっており、ハイトグラフの形状がハイドログラフの形状に大きく影響することがわかる。

3.2. 台風経路と氾濫発生の有無の関係性

数値シミュレーションの結果、21アンサンブル中8アン

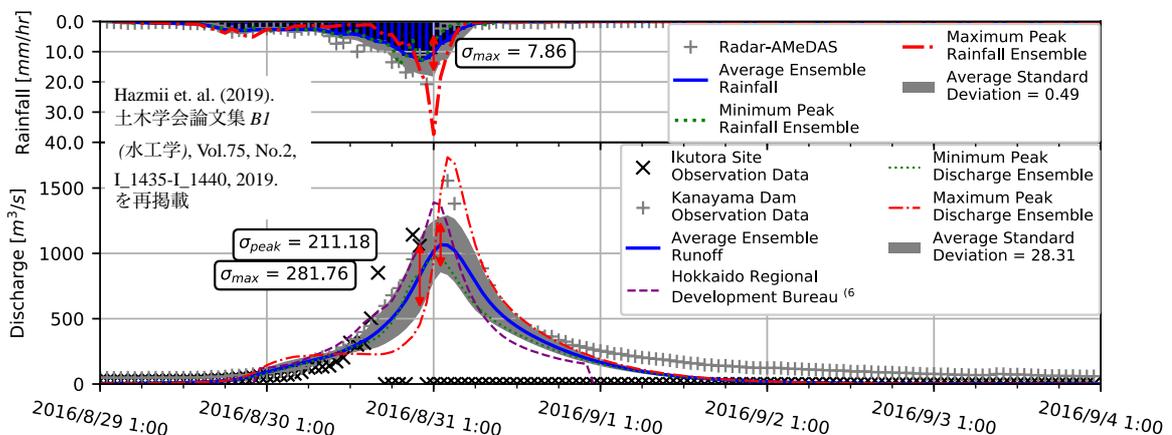


図-2：気象予測モデルの結果を用いた空知川上流域のハイドロ・ハイトグラフ³⁾を加筆した。Radar-AMeDASとはレーダーアメダス解析雨量である。灰色付はアンサンブル平均流出結果からの標準偏差（1 σ ）を表す。なお、イベント時、幾寅観測所は閉局したため、観測値としての幾寅地点のピーク流量は不明である^{3),6)}。

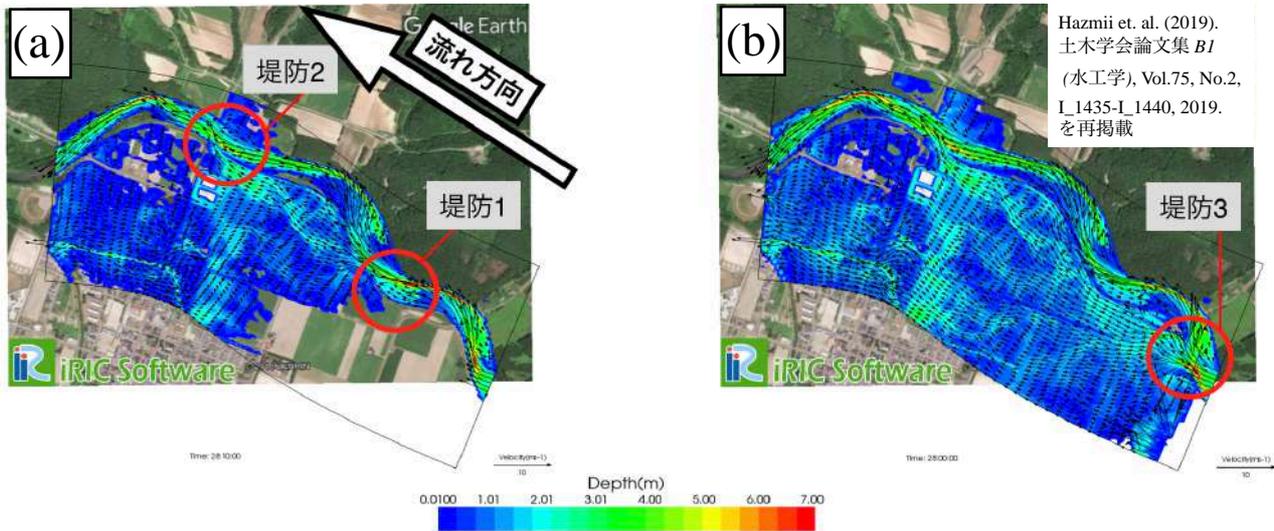


図-3：左図 (a) は越水した8アンサンブルのピーク流量が最小となる氾濫図。右図 (b) は越水した8アンサンブルのピーク流量が最大となる氾濫図。コンターは浸水深[m]を表す。堤防1と堤防2はそれぞれ大勝橋と太平橋の付近に位置する。

サンプルで氾濫が生じ、それ以外は氾濫が発生しなかった。台風の経路に注目すると、氾濫したアンサンブル事例は全て気象庁ベストトラックより東側の進路を通っていた(図-1)。また、ピーク流量が最大の時の台風経路は岩手県を通過せず直接北海道に上陸する事例であった。このように台風の経路が氾濫の発生の有無に大きく関係することがわかった。

3.3. 氾濫形態の不確実性：空間

図-3に越水した2時間後の8アンサンブルにおいてピーク流量が最大と最小となる事例 ($EnsQ_{min_f}$, $EnsQ_{max_f}$) の浸水深[m]を示す。なお、氾濫した8アンサンブルはピーク流量のトップ8事例と一致した。いずれの氾濫も上流にある大勝橋付近の堤防(堤防1)での越水をきっかけとして破堤が生じ、その後、下流にある太平橋付近の堤防(堤防2)に氾濫流の一部がたまり、水位上昇の結果、越水により破堤した(図-3a)。ピーク流量が最大となるアンサンブルのみ更に上流にある堤防(堤防3)と堤防1が同時に越水し、破堤した(図-3b)。このように2日前からは異なる氾濫被害形態も予測され得ることがわかった。

先行研究の氾濫形態⁴⁾は氾濫した8アンサンブルのピーク流量が最小となるアンサンブルの浸水域に近い結果であり、二日前の気象予測から氾濫域及び浸水深を予測できる可能性が示された。一方で、二日前の予測においては浸水しない事例やより浸水深、浸水面積の大きいアンサンブルが存在することがわかり、気象予測に起因する浸水被害の不確実性が明らかになった。

3.4. 氾濫形態の不確実性：時間

氾濫した8アンサンブルの越水開始時間は8月30日の午前1時から午前5時までの4時間の幅を有する(図-4)。

なお、奥田ら⁴⁾の計算結果の越水開始時間は8月30日の午前1時である。次に、最大ピーク流量のアンサンブル ($EnsQ_{max_f}$) を除いた氾濫した7アンサンブル及び奥田ら⁴⁾の計算結果は堤防1での越水からおおよそ20分以内に一部の氾濫流が堤防2から越水し、河川に戻った。それに対して、 $EnsQ_{max_f}$ は堤防1での越水から10分以内に堤防2を破堤する。このように、台風が接近する二日前の予測における洪水の時間差及び破堤開始時間の不確実性の存在を明らかにした。

3.5. 河川水位及び河床変動の不確実性

図-5は堤防1において越水しないアンサンブルの水位が最大となる時間及び氾濫したアンサンブル事例の越水直前における水位分布と河床変動分布を示す。赤色破線と緑色破線はそれぞれ氾濫したアンサンブルの最大と最小ピーク流量の水位分布と河床変動である。北海道開発局の流出計算結果を用いた奥田ら⁴⁾の計算結果と比較す

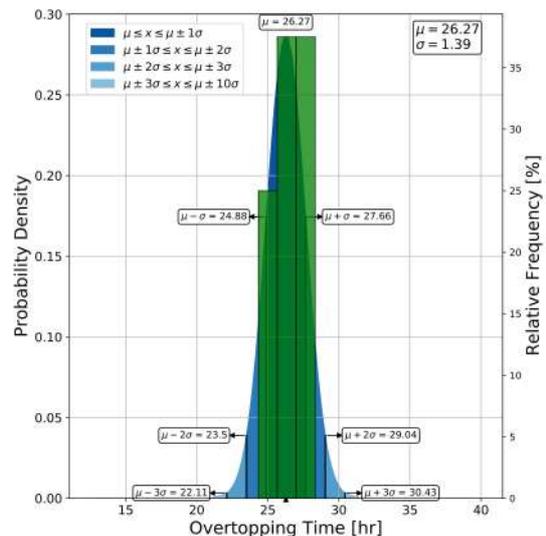


図-4：氾濫した8アンサンブルの越水開始時間の分布。

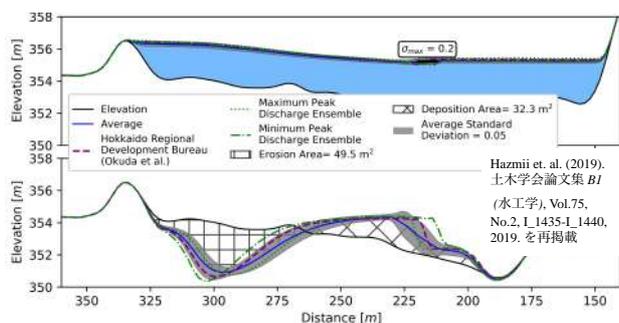


図-5：堤防1の横断面での水位分布と河床高の分布。青色実線は氾濫しないアンサンブルの最大水深となる時間と氾濫したアンサンブルの越水直前の平均をとった水位分布と河床高分布である。紫色破線は北海道開発局の流出計算結果を用いた奥田ら⁴⁾の水位分布と河床変動である。

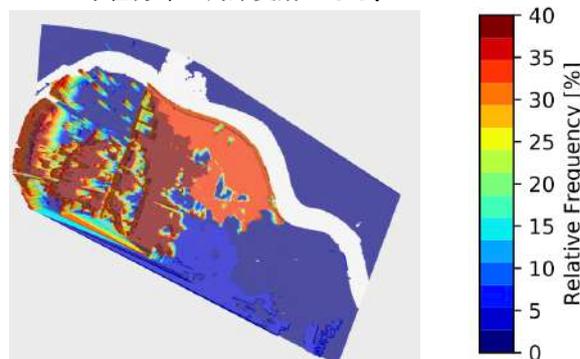


図-6：21アンサンブルの0.5 mを超える浸水深頻度図。

ると、水位と河床変動は標準偏差の範囲に存在する。どのアンサンブル事例でも河床変動のパターンは河床の左岸側での浸食し、河床の中央部での堆積が確認でき、河床変動パターンの不確実性は大きくないことがわかった。

4. 得られた成果の活用法

図-6に21アンサンブルのうち、浸水深が0.5mを超える頻度を示す。同図より、氾濫が発生すると高い割合で0.5mを上回る浸水深となる箇所が存在することがわかる。図-7に示すように災害発生二日前の時点から水害のリスク評価が可能である。氾濫頻度図とF-N図により38%程度の確率で浸水被害が生じ、その際の被害規模の予測も可能となる。

このようにして得られる氾濫被害予測は避難行動の判断指標を提供するものと考えられる。例として、避難に要する時間が十分にある時点で大きな浸水深となる可能性を有する領域として判定された場合には、立ち退き避難（水平避難）と判断することができる。このようにアンサンブル気象予測を用いることで氾濫規模・形態の違いを踏まえたリスク評価が実現する。

5. おわりに

本研究では、二日前の気象予測から降雨流出、洪水氾濫までの一連の解析により、気象予測から洪水被害

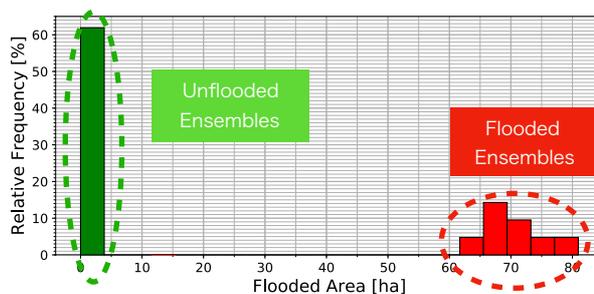


図-7：21アンサンブルの氾濫相対頻度と氾濫面積の関係図（F-Nカーブ）。

の予測可能性、不確実性が評価できた。また、確率的な被害予測に基づくことで、数日前からのリスクベースの避難行動や緊急対応の判断指標となり得ることを示した。

謝辞： 本研究は、北海道開発局と2016年8月北海道豪雨災害調査団（団長：北海道大学・清水康行教授）のもとで作成されたデータを使用した。本研究は氾濫計算モデル、iRICソフトウェアのNays2DHモデルを用いた。また、SI-CAT、有村先生科研費、科研費基盤（B）19H02241からご支援をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水康行. 2016年8月北海道豪雨災害調査報告. 北海道地区自然災害科学資料センター報告=Bulletin of the Natural Disaster Science Data Center, Hokkaido, 30:3 - 48, 2017.
- 2) Dzung Nguyen-Le and Tomohito J Yamada. Simulation of tropical cyclone 201610 (lionrock) and its remote effect on heavy rainfall in hokkaido. 土木学会論文集B1 (水工学), 73(4):I 199[I 204, 2017.
- 3) 小林彩佳, 岡地寛季, グエンレズン, 山田朋人. 降雨観測の空間分布と気象予測に起因する山地流域における降雨量と河川流量の不確実性. 土木学会論文集G (環境),73(5):I 63[I 69, 2017.
- 4) 奥田醇, 清水康行, 久加朋子, 岩崎理樹, 石田義明, 川村里実. 2016年北海道豪雨災害における空知川幾寅地区の破堤・氾濫要因の検討. 河川技術論文集, 第23巻, 6月2017.
- 5) Kazuhiro Yoshimi and Tadashi Yamada. Application of runoff analysis model considering vertical infiltration to long-and short-term runoff (鉛直浸透機構を考慮した流出計算手法の長短期流出解析への適用). Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 70, 2014.
- 6) 北海道開発局. 金山ダム [再現計算] (分布型モデル).
- 7) iRIC. International River Interface Cooperative. <http://i-ric.org/en/>.
- 8) H Takebayashi and Y Shimizu. iric software nays2dh solver manual. 2014.