

損害保険のための日本全域洪水リスク評価モデルの開発 (2) : リスク評価モデルの構築と適用例

長野 智絵¹・津守 博通¹・稲村 友彦¹・佐野 肇²・小林 健一郎³・佐山 敬洋⁴・寶 馨⁵

Development of a Japan Flood Risk Model for General Insurance (2) Development and Application of a Flood Risk Model

Chie CHONO¹, Hiromichi TSUMORI¹, Tomohiko INAMURA¹,
Hajime SANO², Kenichiro KOBAYASHI³,
Takahiro SAYAMA⁴ and Kaoru TAKARA⁵

Abstract

This paper describes a framework to evaluate flood risk in terms of probabilistic distribution of flood damage. The main characteristics of our model are the followings: (1) flood risk in Japan is evaluated as an exceedance probability curve of flood loss and an annual average loss, (2) an integrated rainfall-runoff/flood-inundation model is used to estimate the inundation depth in whole Japan, (3) uncertainties in flood hazard followed by rainfall distribution and levee break and those in flood vulnerability of properties are considered. The model was verified with an application to the plant assets of manufacturing industry. The results showed that the modeled annual average loss of manufacturing industry is in good agreement with the actual 10-year-averaged loss. This model enables quantitative assessment of flood risk and thus it is helpful for flood risk management in government and other industries as well as insurance companies.

キーワード：洪水リスク評価，降雨流出・洪水氾濫モデル，確率破堤モデル，超過確率カーブ，年間期待被害額

Key words: flood risk evaluation, integrated rainfall-runoff/flood-inundation model, probabilistic levee breach model, exceedance probability curve, annual average loss

¹ SOMPO リスケアマネジメント株式会社
Sompo Risk Management & Health Care Inc.

² 損害保険ジャパン日本興亜株式会社
Sompo Japan Nipponkoa Insurance Inc.

³ 神戸大学都市安全研究センター
Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

⁴ 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

⁵ 京都大学大学院総合生存学館
Graduate School of Advanced Integrated Studies in Human Survivability, Kyoto University

本論文に対する討議は平成 31 年 2 月末日まで受け付ける。

1. 序論

自然災害リスクは、保険契約によって個人や企業から損害保険会社に転嫁されている。そのため損害保険会社は、稀に発生し得る大規模災害時に備えて自己資本に対する支払い余力を定量的に把握しておく必要がある。さらに、保険料率の設定や、保険引き受け判断、再保険の検討といった損害保険会社の業務のために、リスクを定量的に把握しておくことが不可欠である。リスクは、災害時に起こりうる損害の大きさとその発生確率とによって定量化されるため、損害保険会社では、確率論的なリスク評価が必要とされている。

本研究の目的は、損害保険業界で利用できる洪水リスク評価モデルを構築することである。それは、豪雨や堤防決壊といった自然現象の持つ不確実性を確率モデルで表現し、洪水による支払い保険金とその発生確率との関係(損害額の超過確率カーブ)を求めるモデルである。損害保険業界で利用するためには、降雨の時空間分布や堤防決壊の有無といった洪水災害の持つ不確実性や、様々な条件下に置かれた財物がどの程度の被害を受けるかという脆弱性の持つ不確実性を確率モデルで表現することで、頻発する小規模な損害から稀に発生する大規模な損害までを定量化できる必要がある。

自然現象の持つ不確実性を考慮して洪水リスクを評価するには、外力やパラメータを様々な組み合わせで与えて、多数のシナリオの下で流出計算や洪水氾濫計算を行う。既往研究では例えば、擬似発生させた数十年分の連続的な降雨データを用いることで、洪水前の土壌水分のばらつきと降雨量の不確実性を考慮して、ダムに流入する確率流量を推定する研究がある¹⁾。また、降雨の空間分布と降雨継続時間を様々に与えることで、降雨の時空間分布の不確実性を考慮して洪水ピーク流量の確率分布を推定する手法が提案されている²⁾。気候変動による河川流況への影響を推定することを目的とした研究では、現在気候、近未来気候、21世紀末気候の条件下で各25年分の流出計算を行い、河川毎の年最大流量を算出している³⁾。これらの研究では流出量に着目しているが、浸水に着

目した研究では、ピーク流量を確率分布に従ってランダムに氾濫モデルに与え、浸水範囲を確率付きで示している⁴⁾。このように、既往研究では、河川整備の観点から河川流量に着目する流出解析と、地域防災の観点から浸水に着目する洪水氾濫解析とが、別々に実施されることも多い。これに対し、損害保険会社は、洪水による財物の浸水被害に対して保険金が支払われるため、降雨によって引き起こされる河川への流出と氾濫を一連のものとして多数のシナリオ(洪水イベント)を作成する必要がある。

日本の洪水リスクを評価した研究として、気候変動による洪水リスクの変化量を推定することを目的として、現在気候と将来気候の条件下で洪水被害額を算出しているものがある⁵⁾。その研究では、日本全国の確率降雨量を洪水氾濫モデルに与えて浸水深を算出し、年平均被害期待額(=年間期待被害額)を推定している。別の研究では、日降水量の年超過確率を全国で算出し、人口と関連付けた洪水被害の発生確率、GDPあたりの洪水被害額関数を用いて、日本全国の年間期待被害額を算出している⁶⁾。また、一級河川水系の確率流量に基づいて、その確率流量を生じさせる降雨分布を洪水氾濫モデルに与えて、年平均被害期待額を推定している研究もある⁷⁾。これらの研究では、日本全国の年間期待被害額を評価することができるものの、流域単位の確率水用量を用いる手法であるため、流域をまたがる1事象の洪水による被害額を算出することができない。損害保険会社では、流域をまたがる事象も含めて1回1回の洪水で発生する損害額を算出し、その発生確率を知る必要がある。また、これらの研究では、ある再現期間の洪水被害は、その再現期間の降雨量あるいはピーク流量からもたらされるとみなされている。これに対し、本論文では、堤防決壊の有無による洪水災害の不確実性や、財物の脆弱性の持つ不確実性によって、同一のピーク流量であっても洪水被害は異なると考える。

本論文では、確率降雨イベントモデルで作成する多数の降雨データを利用して、日本全国の洪水リスクを算出するモデルを開発する。まず、日本

全国の降雨流出と洪水氾濫を一体的に計算する降雨流出・洪水氾濫モデルを開発し、洪水イベントセットを作成する。次に、それを脆弱性・損害額評価モデルと統合し、日本における洪水損害額を確率的に評価するモデルを構築する。最後に、本モデルの適用例として、製造業の事業所資産に対する洪水リスクを評価して示すことで、本モデルの有用性を示す。本モデルの特徴は、次の3点である。

- a) 洪水リスクを年間期待損害額と損害額超過確率カーブという指標で算出できること
- b) 降雨流出と洪水氾濫を一体的に計算する降雨流出・洪水氾濫モデルを用いること
- c) 降雨の時空間分布と堤防決壊の有無による洪水災害の不確実性と、財物の脆弱性の持つ不確実性を考慮すること

2. 洪水リスク評価の概要

洪水リスク評価モデルは、図1に示すように、洪水イベントセットの作成と損害額の評価という2つのプロセスで構成される。洪水イベントセットは、洪水災害の頻度・強さを決める主要因である降雨を確率的に生成する確率降雨モデル、降雨と河川氾濫によって引き起こされる浸水の評価する降雨流出・洪水氾濫モデル、河川堤防の破堤を確率的に発生させる確率破堤モデルによって、作成される。損害額は、建物や財物の種類毎に浸水による損傷率を推定する洪水脆弱性モデル、保険

金額と損傷率から損害額を推定する損害額評価モデルによって、評価される。洪水イベントセットのそれぞれについて損害額を推定することにより、年間期待損害額や損害額の超過確率カーブを作成できる。

本モデルに入力する保険契約データは、市区町村レベルの所在地、住宅・事業所の区別、事業所の業種などの情報が付随している保険金額である。本モデルは、島嶼をのぞく日本全域を対象地域とし、豪雨による洪水(融雪洪水は除く)リスクを評価するものである。

3. 確率降雨イベントモデル

3.1 方法

ここでは、日本全国のどこかで一定規模以上の降雨が発生し、その前後の期間においても日本のどこかで降雨が発生している場合に、その全国的な一連の降雨を「降雨イベント」と呼ぶ。

確率降雨イベントモデルは、過去に起きた降雨イベントと同じような様々な降雨イベントをモンテカルロシミュレーションによって模擬的に発生させるものである。降雨イベントが1年間に何回発生し、どこでどのような強さの降雨が出現するかについて、過去のデータから発生確率分布を求めておき、それと同じ分布となるように多数の仮想降雨イベントデータを発生させる(以下、このデータセットを仮想降雨イベントセットと呼ぶ)。本モデルの詳細は、前報に示したとおりである。

3.2 結果・検証

作成した仮想降雨イベントセットについて、豪雨発生回数と確率降雨量の観点から地方別に統計分析を行い、解析雨量のそれと比較することでデータを検証した。詳細は前報に示したが、地方別に見て、仮想降雨イベントセットの豪雨発生回数と確率降雨量が、解析雨量のそれらと概ね一致することを確認した。これにより、仮想降雨イベントそれぞれの持つ発生確率と降雨量が妥当であると考えられた。

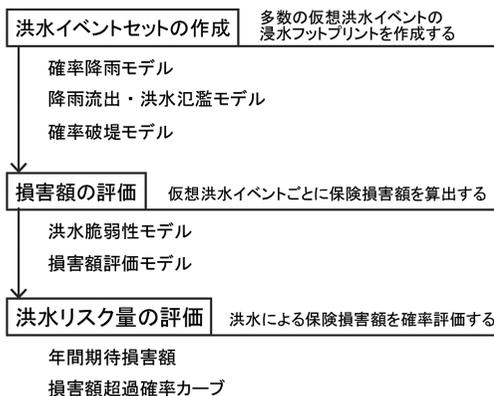


図1 洪水リスク評価モデルの概要

4. 降雨流出・洪水氾濫モデル

4.1 方法

降雨流出・洪水氾濫モデルは、日本全域を対象とした、降雨流出と洪水氾濫を一体的に計算するモデルである。本モデルは、平面二次元で計算される流出・氾濫プロセスと、河道に沿った一次元で計算される流下プロセス、ダム等による流量調整を表現する治水プロセスからなる。

まず、流出・氾濫プロセスでは、入力された降水の一部が浸透流・中間流出となり、残りが地表流となる。河川からの氾濫があれば、その氾濫流も地表流に加わる。地表流の流れは次式の2次元浅水流方程式で表し、その数値計算には、空間方向には水深と流量を1 km 間隔の千鳥格子状に配置した差分法を、時間方向には Leapfrog 法を用いる⁸⁾。

$$(1-\lambda)\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = (P - Q_L - Q_i + Q_f) / A_c \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial v_x M}{\partial x} + \frac{\partial v_y M}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 v_x \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{h_s^{1/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial v_x N}{\partial x} + \frac{\partial v_y N}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - gn^2 v_y \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{h_s^{1/3}} \quad (3)$$

ここに h_s は地表湛水深、 λ は建物占有率、 M, N は流量フラックス ($M = v_x h_s, N = v_y h_s$)、 v_x, v_y はそれぞれ x 方向、 y 方向流速、 H は水位 ($H = z + h_s, z$ は地盤標高)、 P は降水量、 Q_L は浸透量、 Q_i は中間流出量、 Q_f は氾濫流量、 A_c はメッシュ面積、 n はマンニングの粗度係数である。浸透量および中間流出量はタンク型のモデルで計算し、中間流出は、あらかじめ設定された落水線に沿って流出するものとし、kinematic 法で計算する。

$$Q_L = a_L h_s A_c \quad (4)$$

$$Q_i = a_i (h_s - b_i) A_c \quad (5)$$

$$\frac{\partial h_i}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial l} = \frac{Q_i}{A_c} \quad (6)$$

$$q_i = -\frac{h_i^{5/3} \sqrt{I}}{n} \quad (7)$$

ここに、 a_L は浸透係数、 a_i は流出係数、 b_i はパラメータ、 h_i は中間流の水深、 q_i は中間流の単位幅流量、 l は落水線に沿った軸、 I は斜面勾配である。

流下プロセスでは、河道を流下する流れを1次元不定流で表し、その数値計算には、空間方向には水深と流量を交互に配置した有限体積法を、時間方向には4次の Runge-Kutta 法を用いる⁹⁾。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q_r}{\partial l} = q_i - q_f \quad (8)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial l} + \frac{\partial h_r}{\partial l} = s_0 - \frac{n_r^2 |u|}{R^{4/3}} \quad (9)$$

ここに A は流水断面積、 Q_r は河川流量、 q_i は単位長さあたり氾濫流量、 h_r は河道水深、 g は重力加速度、 $u = Q_r / A$ は断面平均流速、 s_0 は水路床勾配、 n_r はマンニングの粗度係数、 R は径深である。氾濫流量は、河川流量が流下能力を超えた場合および破堤が起きた場合に、越流公式で計算される。

治水プロセスでは、ダムによる流量調整の効果を計算する。ダムへの流入量が規定の洪水流量を超えた場合に余剰流量を貯留し、一定量放流方式で下流に放流する。

4.2 入力データ・パラメータ設定

流出・氾濫プロセスの計算に必要な地表データは、日本全域について1 km メッシュで作成した。基盤地図情報数値標高モデル¹⁰⁾から地盤標高を、国土数値情報土地利用細分メッシュ¹¹⁾から土地利用区分を作成した。他のパラメータは、キャリブレーションによって、土地利用区分と流域ごとの値を同定した。

流下プロセスの計算に必要な河道データは、全109の一級水系の本川について作成した。流路は、国土数値情報の河川データ¹²⁾から1 km メッシュに対応付けた。川幅は上流端で10 m、下流端で Google マップで読み取った川幅とし、途中の区間は線型内挿した。また、河道からの氾濫を計算するため、河道の現況流下能力を利用した。流下

能力は、国土交通省から資料が公開されている区間では現況流下能力図¹³⁾から読み取った値とした。その他の区間では、河川整備の現況にばらつきがあると想定し、30年確率年最大日雨量を与えた時のピーク流量と50年確率年最大日雨量を与えた時のピーク流量との間の値をランダムに与えた。河道断面はすべて矩形断面とし、粗度係数はキャリブレーションによって同定した。

治水プロセスの計算に必要なダムの諸元は、ダム諸量データベース¹⁴⁾より取得した。

4.3 キャリブレーション

本モデルのキャリブレーションでは、計算対象河川にある流量観測点の流量および、市街地の浸水域について、本モデルの計算値が観測値とおおむね一致するように、各モデルのパラメータを調整した。入力した気象データは、解析雨量である。

まず、河川流量については、水系ごとに近年の最大洪水事象1つを利用した。河川流量の計算値と観測値¹⁵⁾の誤差関数として、洪水解析の検証に広く利用される Nash-Sutcliffe 係数 (NS) を利用し、既往研究¹⁶⁾を参考にして $NS > 0.36$ をキャリ

ブレーションの基準とした。計算流量と観測流量を比較したハイドログラフを図2に、誤差関数の値を表1に示す。釧路川を除くすべての河川で $NS > 0.36$ の基準を満たしており、河川流量の計算値と観測値がおおむね一致した。

浸水域については、首都圏氾濫シナリオおよび、過去のいくつかの水災事象を利用した。首都圏氾濫シナリオについて、中央防災会議による推定浸水域¹⁷⁾と、本モデルの計算浸水域を比較して図3に示す。計算条件として、利根川右岸136 km 地点からの氾濫流量が中央防災会議と同じになるように、ピーク時に約9400 m³/sと設定した。本モデルの計算結果と中央防災会議による推定結果は、浸水面積、浸水拡大時間についてほぼ一致した。またこの他に、近年のいくつかの水災事象について、本モデルの計算浸水域が、損害保険ジャパン株式会社 (以下、SJ社、現・損害保険ジャパン日本興亜株式会社) の保険金支払い発生地点と概ね重なることを確認した。これより、本モデルは、洪水時の浸水範囲についても、概ねよく再現できていると言える。

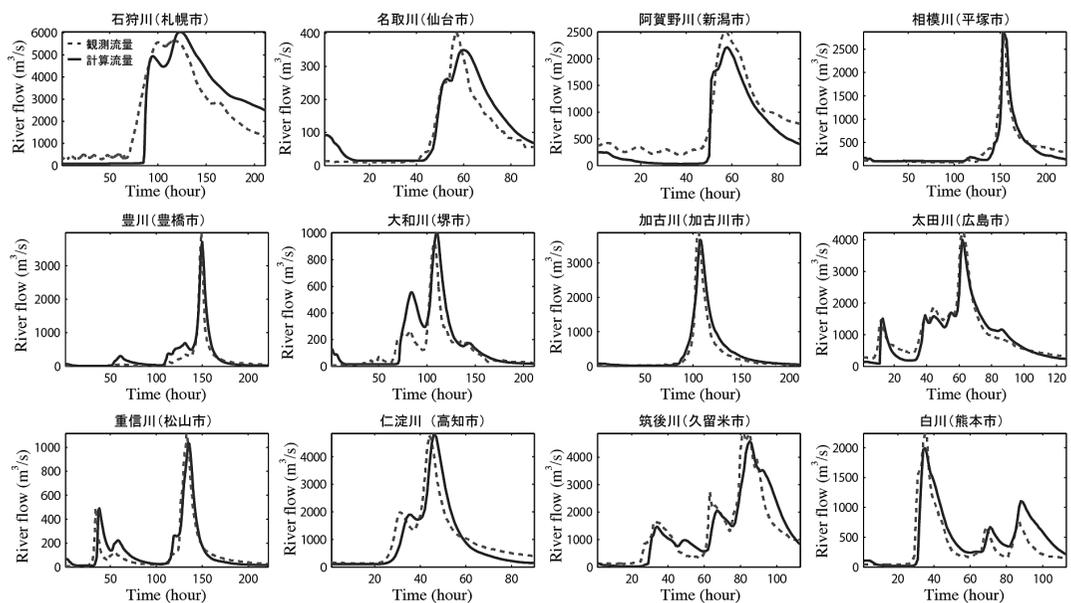


図2 河川流量の観測値と計算値

表1 流量推定の誤差関数

検証に利用した 洪水事象	対象水系	NS
2001 Sep10-11	後志利別川, 鶴川, 沙流川	0.49-0.90
2002 Jul12-13	子吉川	0.87
2007 Jun28-29	荒川(北陸)	0.66
2007 Jul12-13	肝属川	0.92
2007 Sep14-18	高瀬川, 米代川, 雄物川	0.57-0.82
2008 Aug28-31	多摩川,	0.42
2009 TY9	名取川, 阿武隈川, 阿賀野川, 仁淀川, 渡川	0.40-0.91
2009 Jul19-27	佐波川, 山国川, 松浦川, 六角川	0.52-0.92
2010 Jul11-16	江の川, 高津川, 芦田川, 太田川, 梯川, 遠賀川, 嘉瀬川	0.56-0.93
2011 TY2	神通川	0.61
2011 TY12	天塩川, 渚滑川, 湧別川, 常呂川, 留萌川, 石狩川, 尻別川, 十勝川, 樺田川, 宮川, 大和川, 円山川, 加古川, 紀の川, 新宮川, 千代川, 天神川, 日野川, 斐伊川, 吉井川, 旭川, 高梁川, 那賀川, 土器川, 菊川, 天竜川	0.51-0.97
2011 TY15	網走川, 岩木川, 馬淵川, 北上川, 鳴瀬川, 最上川, 久慈川, 那珂川, 利根川, 荒川(関東), 鶴見川, 相模川, 雲出川, 由良川, 淀川, 揖保川, 北川, 吉野川, 重信川, 肱川, 富士川, 庄川, 小矢部川, 手取川, 狩野川, 安倍川, 大井川, 豊川, 矢作川, 庄内川, 木曾川, 大分川, 大野川, 番匠川, 五ヶ瀬川, 小丸川, 大淀川	0.38-0.91
2011 Jun10-16	川内川	0.76
2011 Jun22-29	赤川, 姫川, 信濃川	0.48-0.73
2011 Jul6-7	九頭竜川	0.87
2012 Jun22-Jul8	小瀬川, 黒部川, 常願寺川, 本明川, 緑川	0.49-0.85
2012 Jul11-17	物部川, 筑後川, 矢部川, 菊池川, 白川, 球磨川	0.39-0.87
2013 TY18	鈴鹿川, 関川	0.82-0.83

5. 確率破堤モデル

5.1 方法

確率破堤モデルでは、河川が任意の流況にあるときに、確率的に破堤が発生すると考え、複数の破堤イベント(破堤地点と発生確率)が作成される。本モデルの概要を、図4に示す。

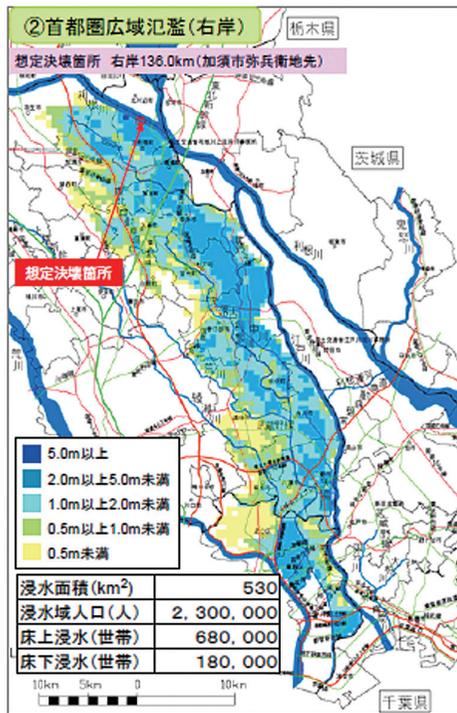
まず、河川に沿った一定区間(河道流下計算の要素に合わせた区間)ごとに堤防の破堤しやすさを設定する。実際の破堤事例を調査した研究¹⁸⁻²⁰⁾によれば、破堤確率に大きく影響するパラメータは、堤防天端幅、堤体断面積、堤防裏法高、堤体土質、河道状況(凸部)、漏水の有無、流下能力と流量の比であった。このうち前5つの項目は河道および堤防の時間的に変化しない特徴と言えるので、本研究では、これを「堤防特性」と考える。次に、洪水継続時間が約15時間を超えると漏水箇所が比例的に増加することから²¹⁾、漏水の有無を洪水継続時間の関数と考える。最後に、流下能力と流量の比の代わりに、洪水氾濫モデルで計算されるピーク流量と流下能力の比を利用する。すな

わち、本モデルでは、流下能力に対するピーク流量の比、洪水継続時間、堤防特性の3つを変数とする二項ロジットモデルとして破堤確率を算出する。

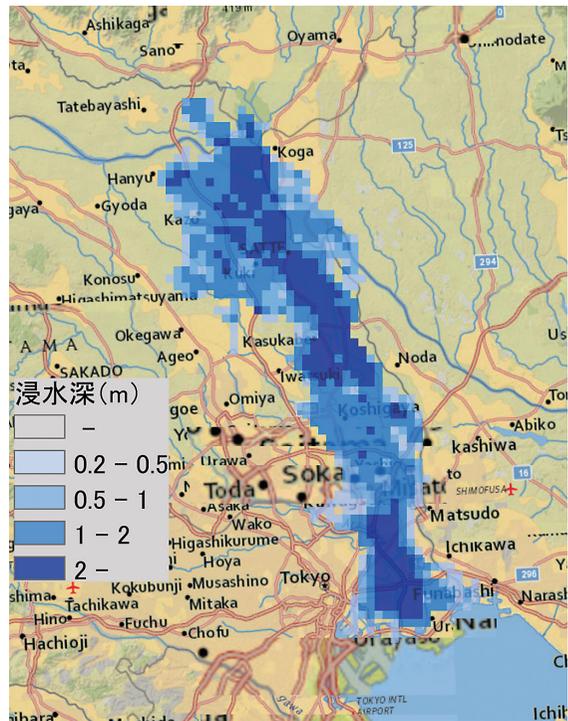
$$p_i = \frac{1}{1 + \exp \left[- \sum_{k=1}^3 \theta_k (X_k - \alpha_k) \right]} \quad (10)$$

ここに p_i は区間 i の破堤確率 ($0 \leq p_i \leq 1$)、 X は堤防の特性要因 ($X_1 =$ ピーク流量 / 流下能力、 $X_2 =$ 洪水継続時間、 $X_3 =$ 堤防特性 ($0 \leq X_3 \leq 10$))、 θ 、 α はパラメータである。 X_1, X_2 は、洪水氾濫モデルから計算される。 X_3 は、河川ごとに公表されている重要水防箇所一覧表の「堤防断面」「法崩れ、すべり」「水衝」「漏水」「旧川跡」の各項目のランク(A, B)をA=2, B=1, 無印=0として合計した数値とする。

次に、一河川(ここでは、分合流点から分合流点まで的一本とみなせる区間)で見た場合の破堤確率を考える。一河川で見れば、1か所で破堤が起これば、その地点より下流側では河道内の流量



最大浸水面積：約540 km²
 浸水拡大時間：約120時間
 (a) 中央防災会議の想定値¹⁶⁾



最大浸水面積：約556 km²
 浸水拡大時間：約139時間
 (b) 本モデルの計算値

図3 首都圏広域氾濫シナリオの最大浸水深の比較

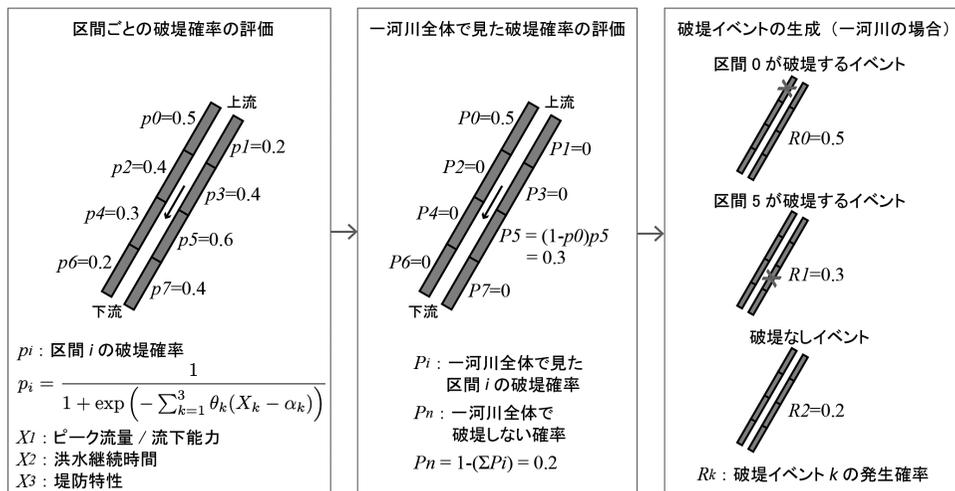


図4 確率破堤モデルの概要

が少なくなるために破堤確率が小さくなると言える。前述の破堤確率は、破堤しない条件下での流量計算値を用いて算出するため、この効果を考慮できていない。そこで、一河川では複数地点の破堤は起きないものと仮定し、上流ほど高い破堤確率で1地点のみ破堤するようにモデル化する。この際、破堤イベントが無数に多くなるのを防ぐため、破堤確率の低い区間での破堤を無視することとし、破堤確率の高い区間(ここでは $p_i \geq 0.5$ の区間とする)のみを破堤候補地点と考える。そこで、破堤確率を以下の式で補正する。

$$P_i = \begin{cases} 0 & \text{if } p_i < 0.5 \\ p_i \prod_{j \in \Omega_u} (1 - p_j) & \text{if } p_i \geq 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

ここに P_i は区間 i の一河川での破堤確率($0 \leq P_i \leq 1$)、 Ω_u は区間 i よりも上流の破堤候補地点である。また、一河川で見た場合に、1か所も破堤しない確率(=破堤なし確率) P_n を、以下で与える。

$$P_n = 1 - \sum_{i \in \Omega} P_i \quad (12)$$

ここに、 Ω は一河川の全区間である。

最後に、異なる河川間では独立に破堤が起きると考え、すべての河川から1か所もしくは0か所ずつの破堤区間を組み合わせることで、破堤イベントを作成する。このとき、各破堤イベントの発生確率は、同時確率で与える。

$$R_k = \prod_{r \in \Omega_r} P_{r,i} \prod_{q \in \Omega_q} P_{nq} \quad (13)$$

ここに、 R_k は破堤イベント k の発生確率、 $P_{r,i}$ は河川 r の i 区間破堤確率、 P_{nq} は河川 q の破堤なし確率、 Ω_r は破堤する河川、 Ω_q は破堤しない河川である。

5.2 入力データとパラメータ設定

計算に必要なデータは、河川の流路に沿った流下能力と、重要水防箇所あるいは堤防詳細点検結果に記載されている堤防の安全性に関する情報である。堤防安全性に関する情報は、国直轄区間については、国土交通省や地方整備局、河川事務所

のwebサイトからダウンロードした。都道府県や市町村の管理区間については、情報の入手が困難であったため、本モデルでは $X_3=5$ とした。

5.3 キャリブレーション

過去の破堤事例を調査した既往研究から、中小河川堤防のピーク水位と破堤確率の関係²²⁾、洪水継続時間と破堤確率の関係²¹⁾等を参考に、パラメータを調整した。

破堤確率に関する研究例は少なく十分とは言えないものの、既往研究から本モデルの妥当性を検証した。既往研究によれば、堤防からの越水が起きても、越流水深が浅く越水時間が短い場合には、破堤しない例が相当数ある²³⁾。本モデルで、 $p_i \geq 0.5$ を破堤あり、 $p_i < 0.5$ を破堤なしと考え、ピーク流量と洪水継続時間と破堤有無の関係を図5に示す。図5で、破堤ありと破堤なしのプロットが重なっているケースでは、堤防特性によって破堤確率が0.5以上にも0.5未満にもなりえる場合を示している。流下能力に対するピーク流量の比が1以上(つまり越水が発生)であっても、洪水継続時間が30時間よりも短い場合には破堤しないケースもあり、吉川²³⁾の図3と総合的であった。

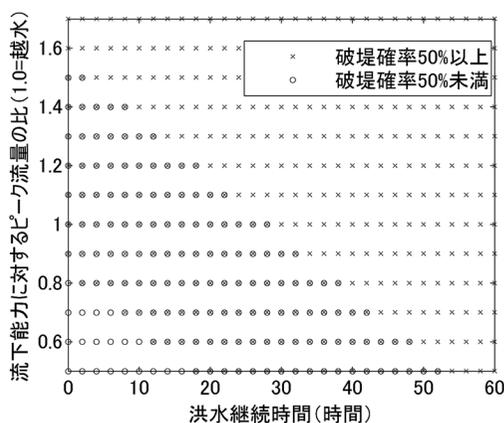


図5 ピーク流量と洪水継続時間に対する破堤有無の関係

6. 損害額の評価

6.1 方法

洪水脆弱性モデルは、浸水による損傷率 (= 被害額 / 資産額) を浸水深の関数で表すものである。本研究では、過去の水災発生時の保険金支払いデータと降雨流出・洪水氾濫モデルの計算浸水深を用いて、損傷率 D を次式で表す。

$$D = ah_s^b + \varepsilon \tag{14}$$

ここで、 a 、 b はパラメータ、 ε はベータ分布 $\beta(p, q, h_s)$ に従う乱数で、 p 、 q はベータ分布の形状母数である。個々の財物が持つ洪水脆弱性の不確実性を考慮して、損傷率にばらつきを持たせることで、幅を持って被害額を推定する²⁴⁾。ここでは、ばらつきをベータ分布で与えているため、損傷率

の分散は $\frac{pq}{(p+q)^2(p+q+1)}$ で表される。これらの

パラメータの値は、財物の種類、例えば住宅や商業ビルといった建物の種類、家財や工場の機械設備といった動産の種類によって異なる値を設定する。それらの値は、過去の保険金支払いデータや、文献を参考に同定する。

損害額評価モデルは、保険会社特有のモデルである。保険金額と損傷率から被害額を算出した後に、免責や補償限度額といった保険条件を適用して損害保険金を算出する。まず、メッシュごとの被害額を、損傷率のばらつきに由来してベータ分布をもつ確率変数として算出する。その被害額から、メッシュ間に相関があるとみなして全国の被害額を合計する。これにより、洪水イベントごとに、全国合計被害額および損害保険金の期待値と分散が算出される。このばらつきもベータ分布であると見做して、全ての洪水イベントに対する全国合計損害保険金をもとにモンテカルロシミュレーションを行うことで、年間期待損害額と損害額超過確率カーブを算出する。

6.2 結果

近年に発生した水災で保険金支払額の多かった上位3つの2011年台風12号(1112)、同年台風15号(1115)、2012年7月九州豪雨(1235)について、

本モデルを用いて損害保険金を推定した。損害保険金は、損傷率のばらつきに由来して、ベータ分布をもつ確率変数として推定される。表2に、本モデルで推定された損害保険金とSJ社填補金を、填補金を1となるようにスケールして示す。いずれも、損害保険金の90%信頼区間に填補金が入っており、計算値が実績値をよく再現できた。これにより、本モデルで1事象ごとの洪水損害額をよく推定できると言える。

7. 洪水リスク評価結果

7.1 再現期間別の浸水深分布

本モデルで作成された洪水イベントセットから、日本全域の洪水による浸水深の超過確率を推定した。図6に、再現期間100年および1000年の年最大浸水深分布を示す。本図は、場所(1kmメッシュ)ごとに浸水深の再現期間を推定した結果であるから、特定の1回の災害によって起こりうる浸水深ではないことに、注意が必要である。

再現期間100年では、豪雨の多い九州、四国地方で浸水深が比較的大きくなっており、この点では既往研究²⁾の結果と同様の傾向と言える。再現期間1000年では、関東平野で広域にわたって浸水深が大きくなっている。

7.2 洪水リスク評価モデルの適用例

本モデルの適用例として、製造業の事業所資産に対する洪水リスクを評価し、水害統計調査²⁵⁾の被害額と比較検討した。水害統計調査では、産業分類別の事業所資産被害額が示されており、製造業で評価対象となっている資産は、従業員30人以上の事業所の償却資産(有形固定資産から土地と建物を除いたものとされている)と在庫資産である^{26,27)}。そこで、これと同等の事業所資産額を本モデルに入力するため、平成26年度工業統計表「産

表2 過去水災の損害保険金推定結果

水災イベント	SJ 社填補金	損害保険金の期待値 (90%信頼区間)
1112	1	0.82 (0.34-1.46)
1115	1	2.16 (0.86-3.39)
1235	1	1.08 (0.34-2.14)

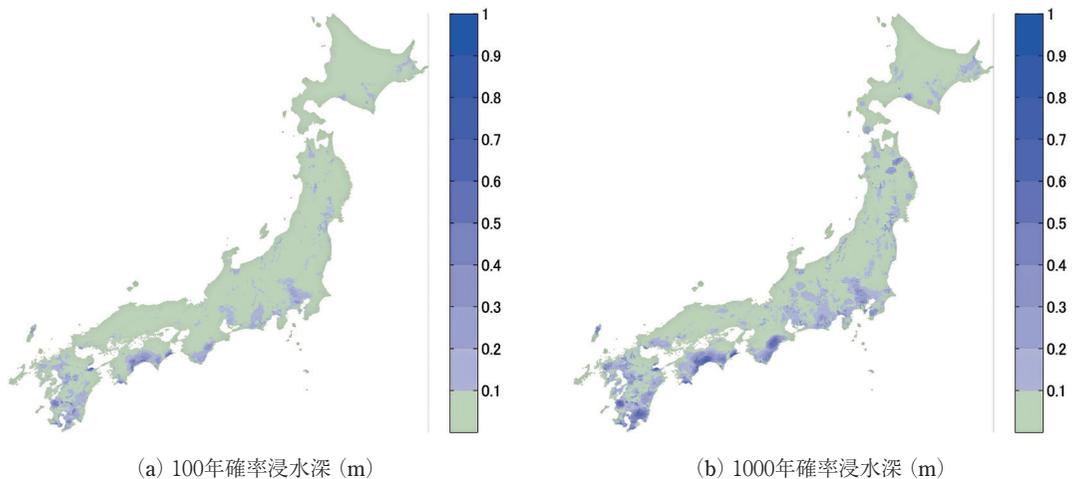


図6 再現期間100年, 1000年の年最大浸水深分布

業編」表3220の産業中分類別・都道府県別の在庫資産額, 有形固定資産額を利用した²⁸⁾。具体的には, 有形固定資産額の年末現在高(土地以外のもの)のうち建物以外を約80%と見なして, これを償却資産額とした。建物以外の割合は, 製造業の有形固定資産の取得額(土地以外のもの)のうち建物及び構築物の割合が全国平均で約20%である²⁸⁾ことから, 仮定した。在庫資産額は, 3区分(製造品, 半製造品及び仕掛品, 原材料及び燃料)合計の年末在庫額を利用した。なお, 秘匿処理の施されているデータは, ゼロとした。これより, 製造業の2014年末事業所資産額(償却資産額と在庫資産額の合計)は, 沖縄県を除く46都道府県合計で約63兆円と見積もり, これを産業中分類別・都道府県別に本モデルに入力した。ここでは, 保険条件は適用せず, 実被害額を評価した。

表3と図7に, 本モデルで評価された製造業の2014年末事業所資産額に対する洪水被害額を示す。年間期待被害額は約63億円となった。再現期間別の被害額は, 1事象当たりで見ると期待被害額(図7ではOEP, Occurrence Exceedance Probabilityと示す)と, 1年間合計で見ると被害額(図7ではAEP, Annual Exceedance Probabilityと示す)でそれぞれ示している。1事象当たり期待被害額で見ると, 再現期間10年の期待被害額は約111億円, 再現期間100年の期待被害額は約594億

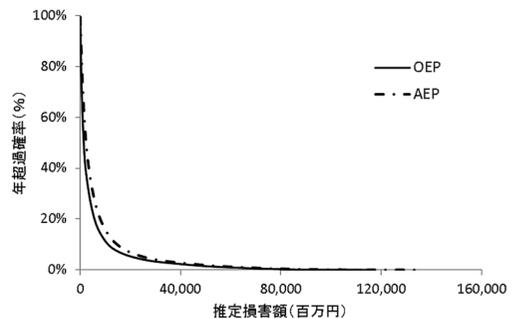


図7 製造業の2014年末事業所資産額に対する洪水被害額の超過確率カーブ

表3 製造業の2014年末事業所資産額に対する年間期待被害額, 再現期間別被害額

超過確率 (%)	再現期間 (年)	1事象当たり被害額 (百万円)	年間被害額 (百万円)
99.95	2,000	97,102	111,147
99.90	1,000	89,932	100,779
99.80	500	82,755	91,001
99.50	200	71,941	78,136
99.00	100	59,401	65,329
98.00	50	43,401	48,442
95.00	20	21,207	25,698
90.00	10	11,136	14,718
80.00	5	5,688	7,997
年間期待被害額			6,287
標準偏差			11,723

表 4 洪水による製造業の事業所資産被害額

	製造業事業所 資産被害額 (千円) ¹⁾	洪水の割合 (%) ²⁾	洪水による製造 業事業所資産 被害額(千円)
2015年	6,720,598	97.6	6,559,304
2014年	3,077,856	70.6	2,172,966
2013年	12,124,854	84.4	10,233,377
2012年	4,266,220	86.2	3,677,482
2011年	27,071,656	83.3	22,550,689
2010年	10,171,112	89.7	9,123,487
2009年	7,233,491	92.4	6,683,746
2008年	2,948,597	94.8	2,795,270
2007年	2,639,999	86.9	2,294,159
2006年	4,305,587	80.6	3,470,303
10年平均			6,956,078

1) 水害統計調査「表 7 資産別等被害 - 産業区分別事業所資産被害額」の製造業の全国合計額(沖縄県を除く)。

2) 水害統計調査「表20 水害原因別被害額」の一般資産・営業停止損失額についての破堤、有堤部溢水、無堤部溢水、内水の構成比の合計。

円、再現期間1000年の期待被害額は約899億円となった。再現期間が長くなると、当然ながら期待被害額は大きくなり、再現期間1000年の洪水の期待被害額は年間期待被害額の約14倍となった。広範囲に豪雨が降り河川堤防が決壊すれば、大きな被害となる可能性があると言える。

表 4 には、水害統計調査から推計した、洪水による製造業の事業所資産被害額を示す。これは、水害統計調査の「表 7 資産別等被害 - 産業区分別事業所資産被害額」の製造業被害額の沖縄を除く全都道府県合計に、「表20 水害原因別被害額」の一般資産・営業停止損失額についての洪水の割合(破堤、有堤部溢水、無堤部溢水、内水の合計割合)を掛けたものである。この推計は厳密ではないものの、本モデル結果と比較するため、対象を合わせるために行った。つまり、本モデルの対象が、沖縄など島嶼を除く地域であること、水害の種類として高潮や津波、土砂災害を除く洪水であることから、これと同等の被害額を推計したものである。表 4 を見ると、2006年から2015年の10年間平均の洪水による製造業事業所資産の被害額は、約70億円である。

本モデルで算出された製造業年間期待被害額の約63億円は、水害統計調査による10年間平均被害額に近い数字であった。また、水害統計調査で

2006年から2015年の最大年間被害額は2011年の約226億円であるが、これは本モデルの結果(表 3 の年間被害額、図 7 の AEP)によれば再現期間約17年であったと言える。これより、本モデルにより、製造業の事業所資産に対する洪水リスクを、過去の実績と比べて妥当な金額で推定できると言える。

ここで示した製造業の従業員30人以上の事業所は、保険契約でいえば工場物件として扱われる分類である。この他に、住宅物件や工場以外の事業所物件があるが、これらについても、ここでは示さないが確認している。以上により、本モデルが、日本全域で抱える洪水リスクを評価するために有用であると言える。

8. 結論

日本全域を対象とする洪水リスク評価モデルを開発した。本モデルは、疑似発生させた多数の降雨イベントから、流出・氾濫モデルと確率破堤モデルによって多数の洪水イベントを作成し、そこに脆弱性・損害額評価モデルを統合することにより、洪水損害額を確率的に評価するものである。本モデルの特徴は、次の3点である。

- 洪水リスクを年間期待損害額と損害額超過確率カーブという指標で算出できること
- 降雨流出と洪水氾濫を一体的に計算する降雨流出・洪水氾濫モデルを用いること
- 降雨の時空間分布と堤防決壊の有無による洪水災害の不確実性と、財物の脆弱性の持つ不確実性を考慮すること

流出・氾濫モデルに関しては、河川流量の計算値が観測値とよく一致すること、浸水域の計算値が中央防災会議による推定浸水域や過去の保険金支払い発生地点と概ね一致することを示した。確率破堤モデルに関しては、ピーク水位と洪水継続時間によって破堤確率が異なるという既往研究と本モデルの計算値が整合的であることを示した。脆弱性・損害額評価モデルに関しては、過去の保険金支払額を計算値が再現できることを示した。また、本モデルを適用して製造業の事業所資産に対する年間期待被害額を推定した結果は、水害統

計調査から推定した製造業事業所資産の10年間平均被害額と概ね一致することを示した。これより、本モデルが、日本全域で抱える洪水リスクを評価するために有用であると言える。今後も、河川や堤防、治水に関する詳細な情報や、関連する最新の研究を参照して、モデルの改良と検証を行っていく予定である。

本モデルを利用することで、損害保険会社では、水災を補償する火災保険の保険料の見直しや引き受け判断のために、経験則ではなく科学的手法に基づいて算出される洪水リスク量を参照できるようになり、利益率の向上につながることを期待される。また、再保険の検討など損害保険会社としてのリスクマネジメントのためにも、本モデルで算出される損害額超過確率カーブは、重要な指標となる。

なお、本モデルの利用は、保険損害に限るものではない。7.1節で示した再現期間別の浸水深は、特定の場所の洪水リスクを知りたい場合に、一般に広く有用と考えられる。また、7.2節で示したように、一般資産額を入力すればそれに応じた洪水被害額を推定でき、その年間期待被害額や特定の再現期間の被害額を知ることができる。このように洪水被害額を確率評価する手法は、自治体や企業の災害対策、リスクマネジメントにとっても、経済価値に基づく意思決定のために活用できるものである。

謝辞

国土交通省には水文データ、ダムや河川に関する資料等をご提供いただいた。岐阜大学宇野尚雄名誉教授には貴重なご示唆をいただいた。ここに記して謝意を表する。降雨流出・洪水氾濫モデルの計算は、京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用して実施した。本研究は、国立大学法人京都大学と SOMPO リスクアマネジメント株式会社による民間等との共同研究および、国立大学法人神戸大学と SOMPO リスクアマネジメント株式会社による共同型協力研究として実施されたものである。

参考文献

- 1) Paquet, E., F. Garavaglia, R. Garçon, and J. Gailhard: The SCHADEX method: A semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation, *J. Hydrology*, 495, 23-37, 2013.
- 2) 田中智大・立川康人・椎葉充晴・萬和明：降雨継続時間に応じた総降雨量の条件付き分布関数による総合確率法の改良, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 71 (2), 63-71, 2015.
- 3) 滝野晶平・立川康人・椎葉充晴・山口千裕・萬和明：地球温暖化に伴う日本の河川流況変化の水系, *水工学論文集*, 54, 475-480, 2010.
- 4) Kalyanapu, A.J., D.R. Judi, T.N. McPherson, and S.J. Burian: Monte Carlo-based flood modelling framework for estimating probability weighted flood risk, *J. Flood Risk Management*, 5, 37-48, 2012.
- 5) 佐藤 歩・川越清樹・風間 聡・森杉壽芳：気候モデルを利用した日本列島洪水リスク評価, *水工学論文集*, 53, 847-852, 2009.
- 6) Bhattarai, R., K. Yoshimura, S. Seto, S. Nakamura, and T. Oki: Statistical model for economic damage from pluvial flood in Japan using rainfall data and socio-economic parameters, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, 6075-6116, 2015.
- 7) 手塚翔也・小野桂介・風間 聡：極値降雨と極値流出の関係に基づいた洪水被害分布推定, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 69 (4), I_1603-I_1608, 2013.
- 8) 小林健一郎・寶 馨・佐野 肇・津守博通・関井勝善：損害保険に応用可能な国土基盤情報準拠型の分布型降雨流出・洪水氾濫モデルの開発, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, 68 (4), I_1069-I_1074, 2012.
- 9) 土木学会：水理公式集例題プログラム集平成13年版, 河川編, 例題2-9, 2002.
- 10) 国土地理院, 基盤地図情報・数値標高モデル, <http://fgd.gsi.go.jp/download/GsiDLSelfFileServlet>, 2013年4月10日.
- 11) 国土交通省, 国土数値情報・土地利用細分メッシュ (JPGIS2.1 型式), <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b-u.html>, 2013年6月20日.
- 12) 国土交通省, 国土数値情報・流路 (統一フォーマット型式), http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/old/old_datalist.html, 2013年6月20日.
- 13) 国土交通省中部地方整備局：木曾川水系河川整

- 備計画, 2008. ほか
- 14) 国土交通省, ダム諸量データベース, <http://dam5.nilim.go.jp/dam/>, 2014年7月12日.
 - 15) 国土交通省河川局, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>, 2014年8月22日.
 - 16) Motovilova, Y.G., L. Gottschalka, K. Engeland and A. Rodhe: Validation of a distributed hydrological model against spatial observations, *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99, 257-277, 1999.
 - 17) 中央防災会議大規模水害対策に関する専門調査会: 大規模水害対策に関する専門調査会報告, p.28, 2010.
 - 18) Uno, T., H. Morisugi, T. Sugii and K. Ohashi: Application of a logit model to stability evaluation of river levees, *Natural Disaster Science*, 9(1), 61-77, 1987.
 - 19) 宇野尚雄・森杉壽芳・杉井俊夫・中野雄治: 被災事例に基づく河川堤防の安全性評価, 土木学会論文集, 400, III-10, 161-170, 1988.
 - 20) Uno, T., T. Sugii and M. Hayashi: Logit model for river levee stability evaluation considering the flood return period, *Structural safety*, 14, 81-102, 1994.
 - 21) 宇野尚雄・杉井俊夫: 河川堤防の被災対策と安
全性評価－被災確率モデルの効用－, 土と基礎, 38 (9), 129-135, 1990.
 - 22) 森 寛典・高木朗義: 堤防の破堤確率を考慮した洪水被害額の算定方法に関する基礎的考察, 河川技術論文集, 13, 297-302, 2007.
 - 23) 吉川勝秀: 河川堤防システムの整備・管理に関する実証的考察, 水文水資源学会誌, 24 (1), 21-36, 1990.
 - 24) Kobayashi, K., K. Takara, H. Sano, H. Tsumori and K. Sekii: A high-resolution large-scale flood hazard and economic risk model for the property loss insurance in Japan, *J. Flood Risk Management*, 9, 136-153, 2016.
 - 25) 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課: 平成18年～平成27年水害統計調査, 2006-2015.
 - 26) 国土交通省河川局: 治水経済調査マニュアル(案), 2005.
 - 27) 国土交通省水管理・国土保全局河川計画課: 治水経済調査マニュアル(案) 各種資産評価単価及びデフレーター, 2015.
 - 28) 経済産業省大臣官房調査統計グループ: 平成26年工業統計表「産業編」, 表3220, 2015.

(投稿受理:平成29年6月22日
訂正稿受理:平成30年2月26日)

要 旨

本論文では, 洪水リスクを確率論的に評価する枠組みについて示す。本モデルの特徴は, 次の3点である。a) 洪水リスクを年間期待損害額と損害額超過確率カーブという指標で算出できること, b) 降雨流出と洪水氾濫を一体的に計算する降雨流出・洪水氾濫モデルを用いること, c) 降雨の時空間分布と堤防決壊の有無による洪水災害の不確実性と, 財物の脆弱性の持つ不確実性を考慮すること。本モデルの適用例として, 製造業の事業所資産に対する洪水リスクを評価し, モデルの有用性を示した。本モデルで推定した製造業事業所資産の年間期待被害額は, 水害統計調査から推定した製造業事業所資産の10年間平均被害額と概ね一致することを示した。本モデルは洪水リスクを定量的に評価することができるため, 損害保険会社だけでなく自治体や企業の洪水リスクマネジメントにも活用できるものと考えられる。