

## 淀川流域の分布型降雨流出・氾濫追跡モデルの開発と 損害保険

小林健一郎\*・寶 馨・佐野 肇\*\*・津守博通\*\*・関井勝善\*\*

\*京都大学 学際融合教育研究推進センター 極端気象適応社会教育ユニット  
\*\*NKSJリスクマネジメント株式会社 研究開発部 定量評価室

### 要 旨

本研究では広域で降雨流出過程と内水・外水氾濫過程を統一的に追跡可能な分布型降雨流出・洪水氾濫追跡モデルを構築する。本稿では特に淀川流域（流域面積8240km<sup>2</sup>）を対象とした。本稿のモデルは従来の広域モデルに比較すると、高解像（250m）で流出・浸水過程を統一的かつシームレスに計算できる利点がある。モデルの基礎データは、国土数値情報の各種データを用いており、行政モデルともできる限り対応可能となるように配慮した。本モデルは、GISをデータ整備の基本ツールとし、座標系を適切に設定することにより、気象・気候モデル、避難モデル、脆弱性・経済損害評価モデルとのインターフェースが構築できるようにしており、洪水による経済損害・保険損害、あるいはその気候変動影響を確率論的に評価することを目的とする。

**キーワード:** 分布型降雨流出・洪水氾濫モデル, 淀川流域, 損害保険, 自然災害モデル

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景

洪水モデルの開発は古くて新しい課題であり、これまでも実用に供するモデルが幾つも開発されてきた。また、洪水モデルを基礎とした河川計画・洪水防御計画の策定により日本の洪水に対する安全が高いレベルで維持されてきた。しかしながら、2011年3月11日に発生した東日本大震災の地震に伴う津波による沿岸域の広域の浸水被害や、2009年の8月9～10日の佐用町水害のような集中豪雨・ゲリラ豪雨による局所的・甚大な被害が多発していることを見ても、洪水災害は過去の問題ではなく、現在まさにそこにある危機（リスク）である。

一方、損害保険業界では、保有する自然災害リスク（予測損害額）を定量化するために自然災害モデルを用いる。自然災害モデルは、その災害の発生頻度・強さをモデル化し、確率論に基づいて生成した様々な時空間パターンを有する災害イベントセットと、建物や財物の損害額を評価する脆弱性・経済損害評価モデルで構成され、災害イベントセットのランダムシミュレーションにより損害額の超過確率を

評価する。洪水に関して言えば、洪水を誘発し、洪水の頻度・強さを決める降雨モデルと、さらに浸水エリアと浸水深を算定する流出・氾濫モデルを組み合わせて洪水イベントセットを構築する。そして、脆弱性・経済損害評価モデルを適用させ、洪水イベントセット全体で洪水損害額の超過確率を評価する。これにより、洪水リスクを損害額ベースで、かつ確率論的に評価することが可能となる。以上の手法は、保険実務で使用されるのはもちろんのこと、国・地方自治体などの行政機関の災害対策・施策決定にも活用できるリスク管理手法と考えられる。

しかし、国内においては、洪水リスクを確率論的に扱う評価手法が十分に整備されているとは言えない。確率洪水リスク評価手法には、不確実性を評価するために確率降雨イベントセットに基づく降雨を入力値とすること、全国に点在する対象物件に対応すべく日本全域をカバーすること、内水・外水氾濫に対して対象物件ごとに浸水深が評価できる程度に高解像度であることが求められる。このような高度な要件がモデル化を困難とさせている原因として挙げられる。

## 1.2 従来の洪水モデリングと課題

これまでの洪水モデリングでは、山地あるいは洪水防御計画における基準点程度までの降雨流出過程は降雨流出モデルにより再現・予測し、この降雨流出モデルにより推定された流量ハイドログラフを境界条件として、都市域河川網について一次元不定流解析を実施する。次に、不定流解析により算定された河道水位・氾濫流量を境界条件として、都市域の外水（破堤・溢水）氾濫解析が実施されてきた。これに加えて、最近では内水氾濫解析に取り組むケースが増え、下水道網の取り扱いに関する研究は最先端の研究分野の一つである。

降雨流出モデルの開発は、細部の物理現象を物理法則で完全にモデリングするというよりは、多少、物理性を抽象化・集中化してでも巨視的に物理量を素早く推定・定量化できるようなモデリングを実施し、特に流域・広域での降雨流出過程（水循環過程）を把握しようというのが要点であると考えられる。この発想が更に拡大し、現在ではこうした水文モデルを地球規模で適用しようという試みも進んでいる。

しかしながら、日本流域の降雨流出モデルなどは100m以下の解像度で適用することも可能になってきたが、全球では数km～数10km程度の解像度が計算資源の観点からも現在の所限界のようである。また、この全球モデルの解像度が将来的に数100m、数10mまで改善されたとしても、モデルの取り扱いに極めて労力・技術力・時間を要するものであり、即座に身近なコンピュータで簡単に使用できる物になるとは考えにくい。

他方、特に都市の氾濫解析は現在解像度を更に高める段階にあり、国土交通省はレーザープロファイラーを用いて、日本全国の都市域における標高データを数mのオーダーで取得している。これら数mオーダーの標高データを用いた氾濫解析の事例も最近では少しずつみられる。洪水災害を自分の事、我が家の事と考えれば、これまでの全球モデルにより例えば新宿と渋谷の水深が同じと言われても納得はしにくい。より高い解像度で、より詳細な解析、例えば盛土・壁などによる浸水過程の変化や、水深の変化を正確に捉えるのが個人レベルでは知りたい情報であるともいえる。しかしながら、このアプローチもおそらくは限界があり、精度は上がっていくと思われるが、今度は技術者の技術力・労力や、金銭面での制約が考えられる。また広域に適用するのは容易ではないと思われる。例えば1m解像度で1km×1kmの範囲をモデル化すれば、節点数は1000000万点になる。このモデリングを日本全国の危険地域に適用するのは容易ではない。

こうした事から数10年先も見越した研究としては、グローバル化、詳細化が一つの方向性であるが、それと並行して各時代の科学技術の発展段階で最先端かつ最適で、かつ手元のコンピュータでも利用できる実用的なモデルの開発が必要であると考えられる。本研究では特にこの点に重点的に取り組んだ。

## 1.3 研究の目的

本研究の目的は、広域流域レベル（例えば淀川流域8240km<sup>2</sup>程度）で、降雨流出過程、内水・外水氾濫過程を区別なく統一的に追跡できるモデルを開発することである。また、モデル化に当たっては、モデルの支配方程式・構成即ができる限り物理法則に従うように努め、かつ解像度も実用上最低限許可能なレベルであることを心掛ける。こうした考慮の結果として、支配方程式は物理法則に基づく連続式、運動量方程式を基礎とし、また解像度を250mとする。この解像度は、日本で行政が整備する洪水ハザードマップの初期バージョンが概ね250m程度の解像度であることから、個人レベルにとっても許容範囲であると考えられる。また、人工構造物（ダム）などによる洪水低減効果も考慮する。

GISをデータ整備の基本ツールとし、座標系を適切に設定することにより気象・気候モデル、避難モデル、経済被害推定モデルともインターフェースを構築できるモデル構成とする。これによりモデルの今後の更なる発展が期待できるからである。モデルの基礎データは概ね国土交通省の国土数値情報データを基本として、行政モデルと同一の枠組みでモデルを構築することにも配慮した（国土交通省、2011）。本研究の流出・洪水氾濫モデルは、自然システム、経済システム、社会システムを統合的に検討できる基礎となることを目指しており、例えば、これと気象モデル、気候変動影響モデル、脆弱性・経済損害評価モデル等を組み合わせることで、高度かつ社会ニーズに柔軟に対応した総合的な洪水リスク評価モデルが構築できると期待される。最終的に、本モデルを気候変動影響を取り入れた確率降雨モデルと脆弱性・経済損害評価モデルと組み合わせることで、洪水による将来の経済損害・保険損害、あるいはその気候変動影響を確率論的に評価することを目指している。

## 2. 河道網モデリング手法の開発

流出・氾濫モデルを作成するにあたり、まず、その対象流域の河川形状、位置、流域地形をグリッド上（ここでは250m解像度）で数値化する必要がある。

本研究では広域流域を対象としており、モデル化するエリアが広範であるため、GISを基礎として河道網構築法および河床標高算定方法を自動化した。

### 3. 川幅モデリング手法の開発

流出・氾濫追跡モデルで河川水位を評価するために、河道節点（250m解像度）における川幅が必要となる。一級河川等、主要河川については河川断面データが整備されているものの、その他多くの中小河川の断面データは十分に整備されていない。しかし、本研究では広域の流出・氾濫追跡シミュレーションを目的としており、一級河川のみならず、中小河川も計算対象で、一貫した手法に基づく川幅算定手法を構築する必要がある。そこで、本研究では広域でデータが整備されているGIS河岸データおよび、一部衛星写真を用いた川幅算定手法を開発した。

### 4. 淀川流域流出・氾濫シミュレーション

整備した250m解像度のグリッドセルで平均化された標高、土地利用、浸透能データ、及び河道網データを用いて、降雨流出過程と内水・外水氾濫過程を一体的にシミュレーションできる分布型の降雨流出・洪水氾濫追跡モデルを構築する。基礎原理、基礎方程式を以下に示す。モデル化した河道網はFig.1のようである。なお、佐用町に適用した例として小林ら（2011）を参考にされたい。

#### 4.1 分布型降雨流出・洪水氾濫追跡モデル

本稿のモデルでは河道網の流れは一次元不定流解析により追跡し、流域の斜面や市街地の流れ（以後堤内地流と呼ぶ）は二次元浅水流モデルにより追跡する。

##### 4.1.1 河道の一次元不定流計算

一次元不定流計算については以下の連続式と、抵抗則にManning公式を用いたSt.Venant式を適用する。連続式：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

運動量方程式：

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = s_0 - \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}}$$

ここにAは河道での流水断面積、Qは河道内流量、qはx方向の単位長さあたり横流入出量（流入が正）、gは重力加速度、u=Q/Aは断面平均流速、s<sub>0</sub>は水路床

勾配、nはマンニングの粗度係数、Rは径深である。数値計算には特性曲線法を用いる。

##### 4.1.2 堤内地の二次元氾濫計算

堤内地の氾濫解析には二次元浅水流方程式を用いる。連続式：

$$(1-\lambda) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = Q_{in/out}$$

運動量方程式：

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - gn^2 v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

ここにhは水深、λは建物占有率でセルの全面積に対する建物の割合、M=uh、N=vhでM、Nは流量フラックス、u、vはそれぞれx方向、y方向流速、Hは水位、Q<sub>in/out</sub>は単位面積当たりの二次元格子への流入出量である。h、M、Nを千鳥格子状に配置し（staggered grid）、時間方向差分には陽的解法のLeap frog法を用いる。

この手法は氾濫解析手法を流域全体に拡張したとも言えるし、分布型降雨流出モデルで一般に適用されているkinematic wave法を1次元・2次元不定流モデルで代替したものともいえる。参考文献として、井上ら（2005）、川池ら（2005）、佐山ら（2008）、立川ら（2007）、小林ら（2010）を挙げる。

##### 4.1.3 森林土壌の扱い

森林については、一定の浸透能を超えると表面流が発生するとした。この浸透能はパラメタとして観測値が存在する地点での計算流量と観測流量が合致するように与える。一方、中間流は降雨強度に線形比例して発生するとした、降雨強度が浸透能を超えると一定量の中間流が発生するとしている。定式化は以下のようである。

If (Rain < InfMax) InterFlow = α\*(Rain/InfMax)

If (Rain > InfMax) InterFlow = α\*(InfMax/InfMax) = α

ここにαとInfMaxは同定が必要なパラメタでαは係数、InfMaxは最大浸透能、Rainは各地点の降雨強度、InterFlowは中間流量である。この定式化は物理法則を基に誘導したわけではなく、森林土壌の流れのより具体的な取り扱いについては今後の課題である（例えば寶，2004）。

##### 4.1.4 ダムモデル

比奈知、青連寺、室生、布目、高山、日吉、天ヶ

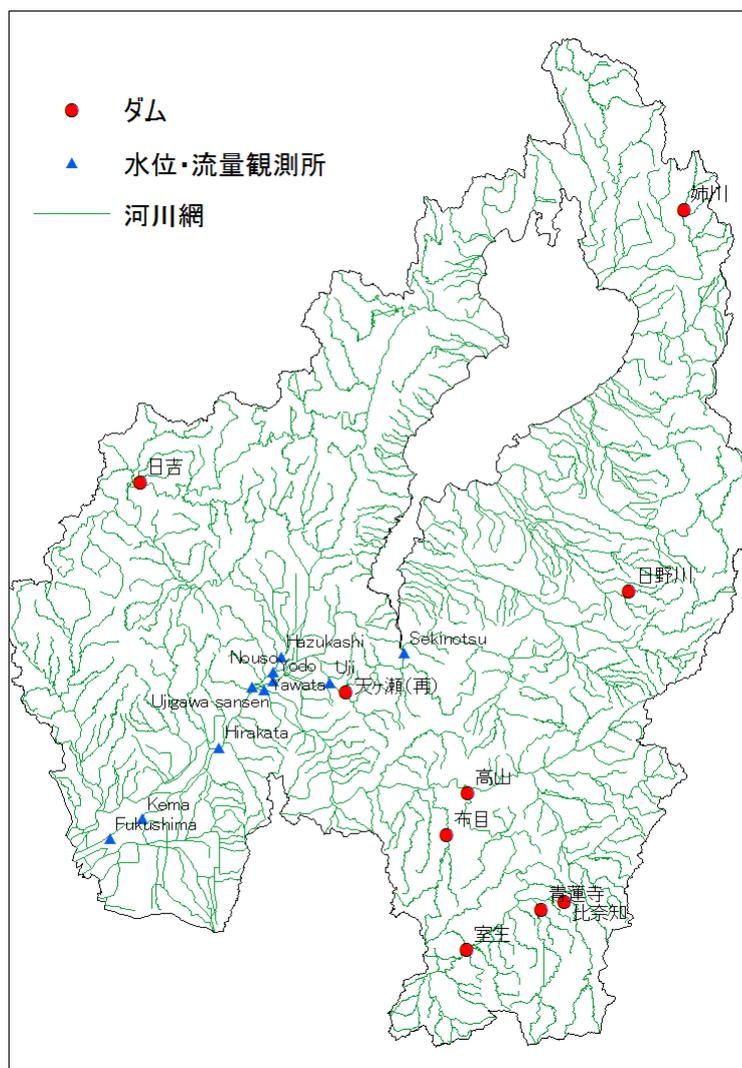


Fig. 1 The river network, water stage/discharge observatory and dams of the Yodogawa river catchment

瀬，日野川，姉川ダムの位置に何らかのダム操作を組み込んだ。これらの位置をFig.1に示す。ダム操作については行政からのデータ取得状況が不均一であるため，洪水流量を超えた場合，余剰流量を貯留し（ピークカットを実施し），流入流量が洪水流量を下回った後には，余剰流量が放流完了されるまでは一定量（洪水流量相当）の放流を継続するとしてモデル化を行っている。

#### 4.2 計算結果

2009年10月8日～9日に淀川流域に発生した洪水の際のデータを用いて検証を行った（水資源機構，2011）。モデルの検証は同じくFig.1に示された水位・流量観測所の位置で実施した。本稿では特に枚方地点での計算流量と観測水位をH-Qにより変換して得

た（観測）流量の比較をFig.2に示す。これから，淀川モデルは（観測）流量を比較的良く再現していることがわかる。Fig.3に同期間で計算された淀川流域全体における浸水深を示す。市街地（平野部）で床下浸水（水深50cm以下）が発生し，一部高い浸水深が計算されている。Fig.4には計算時間で38.9時間が経過した時点での河道流量分布を示す。木津川本川で高い流量が計算されているのがわかる。

#### 5. 結語

本研究では広域で降雨流出過程と内水・外水氾濫過程を统一的に追跡可能な分布型降雨流出・洪水氾濫追跡モデルを新規に構築した。本稿では特に淀川流域（流域面積8240km<sup>2</sup>）を対象とした。本稿のモデ

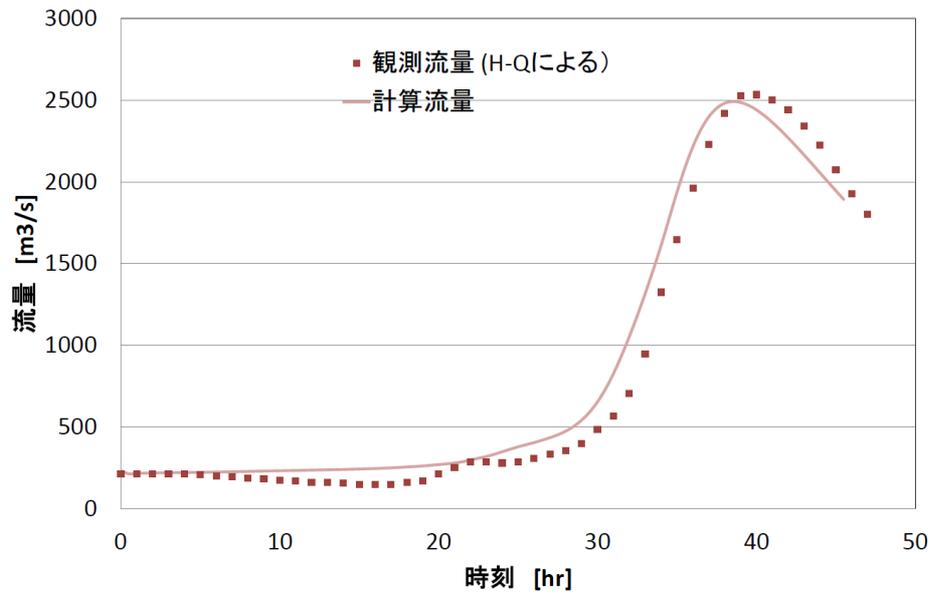


Fig. 2 The observed discharge (by H-Q) and simulated discharge at the Hirakata

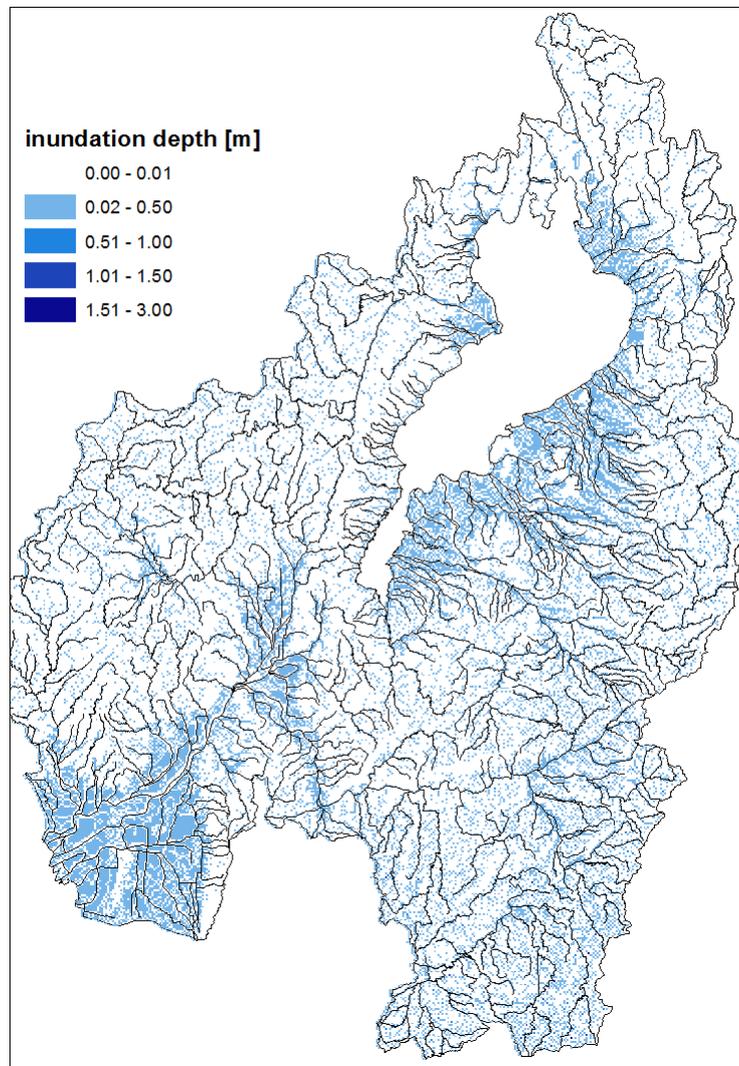


Fig. 3 The simulated inundation depth of the entire Yodo river basin

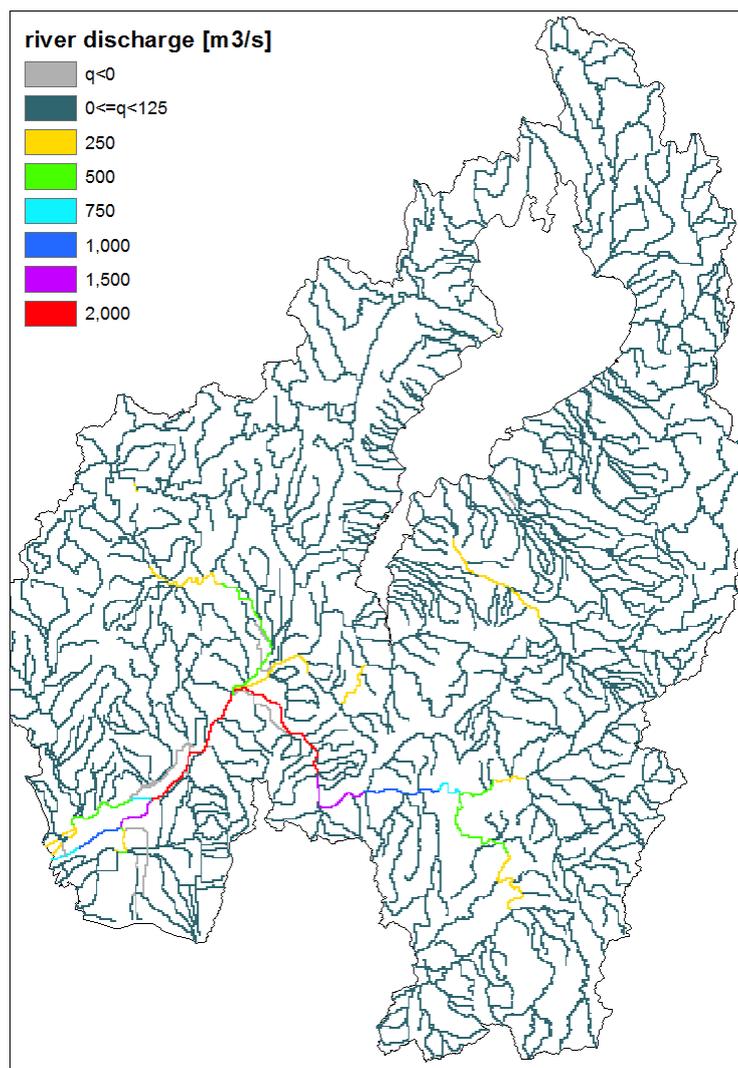


Fig. 4 The simulated discharge distribution after 38.9 hrs

ルは従来の広域モデルに比較すると、高解像 (250m) で広域の流出・浸水過程を統一かつシームレスに計算できる利点がある。モデルの基礎データは、国土数値情報の各種データを用いており、行政モデルともできる限り対応可能となるように配慮しているのも利点である。GISをデータ整備の基本ツールとし、座標系を適切に設定することにより、気象・気候モデル、避難モデル、脆弱性・経済損害評価モデルとのインターフェースが構築できるようにした。最終的に、本モデルを気候変動影響を取り入れた確率降雨モデルと脆弱性・経済損害評価モデルと組み合わせることで、洪水による将来の経済損害・保険損害、あるいはその気候変動影響を確率論的に評価することを目指している。今後はこのモデルを関東、中部流域にも適用し、徐々に日本全国をカバーしていく予定である。

## 謝 辞

国土交通省・近畿地方整備局、滋賀県には水文データ、ダム操作規則、資料等を提供して頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

また、本研究は、京都大学と損保ジャパン・リスクマネジメント株式会社 (現：NKSJリスクマネジメント株式会社) による「民間等との共同研究」として実施されました。

## 参考文献

井上和也・戸田圭一・前田修 (2000) : 河川網が発達した領域での氾濫解析法とそのメコンデルタでの適用, 土木学会水工学論文集第44巻, pp. 485-490.  
川池健司・井上和也・戸田圭一・野口正人 (2005) :

- 低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析, 土木学会論文集, No.751/II-67, pp.57-68.
- 国土交通省 (2011) : 国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 小林健一郎・寶馨・奥勇一郎 (2011) : 統合型降雨流出・洪水氾濫モデルによる佐用町洪水災害分析と経済被害推定, 土木学会水工学論文集 第55巻, pp.949-954.
- 小林健一郎・寶馨・中北英一 (2010) : 全球気候モデル出力と洪水及び経済被害推定モデルを用いた中小河川の水害リスクの将来変動に関する研究, 河川技術論文集第16巻, pp.495-500
- 佐山敬洋・立川康人・寶馨・増田亜美加・鈴木琢也 (2008) : 地球温暖化が淀川流域の洪水と貯水池操作に及ぼす影響の評価, 水文・水資源学会誌, vol. 21, no. 4, 296-313.
- 寶馨 (2004) : 流域全体から「緑のダム」の治水効果を見る, 緑のダム, 蔵治光一郎+保屋野初子編, pp. 78-103, 築地書館.
- 立川康人, 佐山敬洋, 寶馨, 松浦秀起, 山崎友也, 山路昭彦, 道広有理 (2007) : 広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用, 自然災害科学, Vol. 26, No. 2, pp. 189-201.
- 水資源機構 (2011) : 名張川上流3ダムの統合操作による洪水調節, <http://www.water.go.jp/kansai/kizugawa/09topic/pdf/dobokugakkai.pdf>.

## **Development of a Yodogawa River Distributed Rainfall-Runoff/Flood Inundation Simulation Model and its Application to Non-life Insurance**

Kenichiro KOBAYASHI\*, Kaoru TAKARA, Hajime SANO\*\*, Hiromichi TSUMORI\*\* and Katsuyoshi SEKII\*\*

\*Educational Unit for Adaptation to Extreme Weather Conditions and a Resilient Society, Kyoto University

\*\* Natural Catastrophe, Research and Development Department, NKSJ Risk Management, Inc.

### **Synopsis**

The development of a large-scale distributed rainfall-runoff/flood inundation simulation model is dealt with in this paper. The distributed model can simulate the rainfall-runoff, dike-break and inland flood inundation process simultaneously in a seamless and integrated manner. The model is applied to the Yodogawa river catchment (catchment area 8240 km<sup>2</sup>). Many of the necessary basic information for the model development are obtained from the Digital National Land Information of the Ministry of the Land, Infrastructure, Transport and Tourism. This is the intention that the new model is compatible with the river administrator's model. The data process is carried out with GIS so that the coordinate system of the model is appropriately set up which can have the interface with other models such as weather, climate, evacuation, vulnerability and financial models. With such models, the model in this study is able to estimate economic and insurance losses caused by flood and the impact due to climate change.

**Keywords:** distributed rainfall-runoff/flood inundation model, the Yodogawa river, non-life insurance, natural catastrophe model