

## 物理ダウンスケール法による極端台風を用いた淀川流域の洪水評価

小林健一郎<sup>(1)</sup>・奥勇一郎<sup>(2)</sup>・寶 馨・石川裕彦・竹見哲也・中北英一

(1) 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

(2) 大阪市立環境科学研究所 研究調査課

### 要 旨

本稿では物理ダウンスケール法による極端台風の出力降雨を淀川流域降雨流出・洪水氾濫モデルに入力することにより、淀川流域における洪水評価を実施する。石川ら (2012) は、1979年16号台風 (T7916) の再現計算、T7916の初期位置を側方移動する仮想台風実験、これに気候変動に伴う将来の温暖化バイアスを加えた疑似温暖化実験を実施した。この仮想台風実験、疑似温暖化実験結果から最大の累積降水量を示す2つの台風事象 (現在最大、将来最大降雨) を抽出し、これを淀川流出・氾濫モデルに入力し、基準点 (枚方地点) での最高水位、最大流量及び淀川流域全体での内水浸水深を試算した。結果として、将来最大降雨による枚方地点での最高水位が11.4mとなり、計画高水位13.23mにも迫る数値が推定された。さらに、道路冠水レベル (浸水深20cm以上) の浸水が広範囲で生じることが計算結果から分かった。

**キーワード:** 分布型降雨流出・洪水氾濫モデル、淀川流域、極端台風、極端洪水、疑似温暖化実験

### 1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災と地震に伴う津波災害からの教訓として、これまでの災害防御計画の設計外力を超えるような自然外力と、その外力により生じる結果 (災害) についても、まず想定自体は行っておくべきだとの共通見解が広まりつつある。最近良く言われる「想定外をなくすべき」であるという主張である。一方、極端降雨による河川洪水災害に関しては可能最大洪水を求めるといった試みは昔からある程度実施されてきた。

科学的に妥当な最大外力を設定するのは実際には難しい。このため日本の河川洪水分野においては、100年、200年降雨といった確率指標で外力 (降雨) を設定するのが通常である。これを超える降雨外力について考える場合、例えば、過去日本のどこかの地域で発生した最大レベル降雨が対象地域でも発生すると考える方法がある。この方式は各地域レベルの特性 (位置、地形、気候区分等) は必ずしも考慮していない。したがって水文学・気象学的には疑問が残るが、日本で実績のある最大レベルの降雨

による洪水災害を想定しておくという点で、計画論的にはある一定の合理性があると考えられる。

他方、地域性を考慮して可能最大降水量を考える場合、例えば実績降雨データを用いて降雨面積、降雨継続時間、面積雨量の関係を求め、可能最大降水量を推定するDAD解析がある (例えば寶・端野, 2000)。DAD解析は淀川であれば淀川流域における実績降雨を基にした解析であるから、これにより推定される可能最大降雨は、日本最大レベルの降雨よりは一般には小さい。ただし、降雨の地域間差を考えるとこの点でより説得力がある。

また、気象モデルによる数値シミュレーションに基づいた外力設定も可能である。数値シミュレーションの場合、各地域の特性 (地形等) をモデルに組み込むことができ、初期、境界条件なども物理的に妥当な範囲で柔軟に変更することができるなど利点が多い。ただし、数値シミュレーションの場合、過去事象の再現計算でない限り結果は予測であり、不確実性がある。また、再現精度にも限界があり、これまでの物理モデルでは再現できないような特異な現象は、数値シミュレーションを行ったとしても推

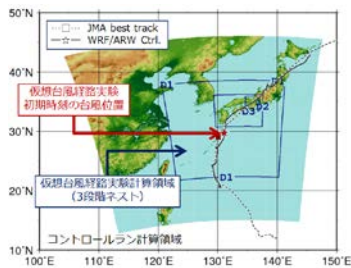


Fig. 1 T7916 best track, control run and computational domain

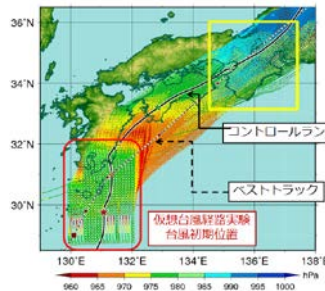


Fig. 2 Tracks of the ensemble simulations

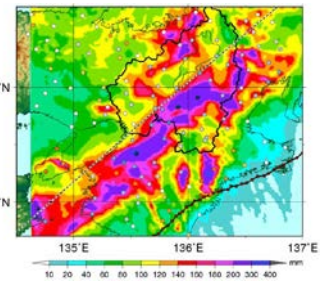


Fig. 3 Cumulative rainfall of the worst pseudo-global experiment result

定はできない。このように各方式の得失を考えていくと、現実的な対応としては様々な方式で想定を行い、計画立案のための選択肢を提供し、最終的には専門家・行政・市民らが協議を重ねることを通じて、選択肢の中から方針を定めるしかないと思われる。

したがって、本稿でも極大洪水を推定する一手法として、特にシミュレーションにより想定された極端降雨を入力とする極端洪水の算定法を示す。具体的には、奥ら (2010)、石川ら (2012) により実施された物理ダウンスケール法による近畿地方を対象とした極端台風群計算結果の二つを小林ら (2012) の淀川流域分布型降雨流出・洪水氾濫 (Distributed Rainfall-Runoff/Flood-Inundation, DRR/FI) モデルに入力し、淀川流域全体での洪水評価を実施する。なお、淀川モデル検証過程などの詳細については紙面を要することから別報に譲ることとし、本稿では極端洪水の推定結果を示すことに止める。また、本稿のモデルパラメタは小林ら (2012) と異なり、1997年8月5～7日、2009年10月7～8日、伊勢湾台風など過去複数の洪水により再設定したものである。特に計算結果が後者の最近の2洪水事例に適合するようにキャリブレーションしている。

## 2. 極端台風

石川ら (2012) は、1979年16号台風 (T7916) を対象とした疑似温暖化実験を実施した。T7916は、1979年9月23日にフィリピンの東海上で発生し、26日には沖縄の南海上で中心気圧920hPaまで発達した。30日夕刻に室戸市に上陸、同日夜半に大阪市に再上陸したのち、彦根市、岐阜市などを通過し本州を縦断し根室沖で温帯低気圧化した。この経路は、京阪神地区に大きな災害をもたらすいわゆる「室戸コース」と呼ばれるものである。

石川らは、まずこの台風の再現実験 (コントロールラン) を行った。コントロールランの結果はFig. 1中に実線で示してある。破線で示した気象庁の解析結果と比べる

と経路に若干のずれはあるが、ほぼ解析された経路に沿って移動している。次に、Fig. 1 に星印で示した位置に台風が到達した時刻 (1979年9月29日12UTC) で渦位逆変換法を適用し、台風位置を10 km間隔で側方に移動させた仮想台風実験を行った。これらの結果をFig. 2に示す。

Fig. 2には全部で509例実施した仮想台風実験の全ての経路を示してある。赤い星印で示した地点に中心を持つ台風を、Fig. 2の赤枠で示した範囲で側方移動させたものを初期値としてアンサンブル計算を行った。509例のそれぞれのケースについて、台風が日本の東海上に抜けるまで計算を行っているが、この図では近畿地方を通り過ぎるまでの結果を拡大して示してある。このアンサンブル計算の中で積算降水量が最大 (コントロールランの1.5倍) となる事例を後述の淀川モデルに入力した。これを以後、現在最大降雨 (図中ではshift) と呼ぶ。

次に、このアンサンブル計算の中から、淀川流域積算降水量、最大1時間降水量で最大を記録した上位20例について、海面温度に温暖化バイアスを加えた疑似温暖化実験を実施した。海面温度の温暖化バイアスはCMIP3から、T7916が上陸した9月のモデル・アンサンブルを作成して用いた。Fig. 3に、これらのケースの中で積算降水量が最悪となったケースの降水量分布を示す。この事例では、現在気象でのコントロールランの2.26倍となった。現在気象の最大ケースと比べると、疑似温暖化により流域降水量は約1.5倍に増加したことになる。このバイアスを加えた疑似温暖化実験結果を、以降将来最大降雨 (図中ではpgw) と呼び、これについても淀川モデルに入力する。

## 3. 淀川流出・氾濫モデル

淀川流域分布型降雨流出・洪水氾濫モデル (DRR/FIモデル) の概要を以下に簡単に説明する。この分布型モデルでは流域内堤内地の水流動は二次元浅水方

程式、河道流は一次元不定流方程式で追跡する。堤内地と河道網の間では流入・溢水などにより越流公式に基づき水が交換する。ダム位置で洪水防御のための操作ルールをモデルに組み込み、ダム位置及び水位・流量観測所において観測水位・流量を計算値と比較しモデルの検証を行っている。

### (1) 河道網の一次元不定流計算

河道流は一次元不定流解析により追跡する。運動量方程式は抵抗則に Manning 公式を用いた St.Venant 式を適用する。

連続式：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{in/out}^{Dike} \quad (1)$$

運動量方程式：

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

$$q_{in/out}^{Dike} = 0.35h_1 \sqrt{2gh_1} \text{ or } 0.91h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (3)$$

ここにAは河道での流水断面積、Qは河道内流量、 $q_{in/out}^{Dike}$

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、 $s_0$ 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。式(3)は越流公式で、 $h_1, h_2$ は、河道水深あるいは河道位置堤内地水深から、河道水深の場合は堤防高、堤内地水深の場合は堤内地地盤高から堤防天端までの鉛直距離を指し引いた値で、 $h_1$ の方が大きい方の値である。本稿では、淀川本川については堤防高を考慮した。式(3)の第一式が完全越流、第二式が潜り越流となる。数値計算には特性曲線法を用いる。

### (2) 堤内地の二次元氾濫計算

堤内地の氾濫解析には2次元浅水方程式を用いる。

連続式：

$$(1-\phi) \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = \sum \frac{q_{in/out}^{Dike} \cdot D_x^{Dike}}{A^{Cell}} + (rain - rainLoss) + q_{add} \quad (4)$$

運動量方程式：

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - gn^2 v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (6)$$

ここにhは水深、 $\phi$ は建物占有率で2次元格子セル面積

$A^{Cell}$  (250m×250m) 中の建物の割合、 $M = uh, N = vh$ でM, Nは流量フラックス、u, vはそれぞれx方向、y方向の流速、Hは水位である。 $D_x^{Dike}$ は一次元河道計算の節点間距離 (250m) で、式(4) 右辺第一項は、2次元格子セルと対応河道節点での水交換の総和を記述している、rainは降雨量 (mm/hrからm/sに変換：解像度1kmを250mに内挿)、rainLoss,  $q_{add}$ については以下を参照されたい。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。

### (3) 森林における表面流、中間流の取扱い

土地利用形態で森林と判断される範囲では、「樹幹遮断等+浸透能=rainLoss」をrainから差し引き入力降雨とする (式(4))。rainLossはパラメタとしてダム位置など観測値が存在する地点で計算・観測流量が合致するように与える。ここでは、特に土壌の種類に従い、浸透能を高・中・低に分類している。ただし、森林では降雨の一部は地下へ浸透し、地表面に再流出したり、河道に直接流出する。これらの現象を物理的に追跡しようとすると、解像度250mでは再現できない現象も多いと考えられる。したがって、これらの現象についてはタンクモデルの取扱いをする。具体的には各計算節点で降雨強度に線形比例する $q_{add}$ を算定し、これを式(4)右辺に追加する。地下構造の把握が容易でないことに加え、亀裂などがあると地下での水流動形態が変化するため、このように河道に戻る全量を表流水計算空間で空間平均的に割り振って考えることにする。定式化は以下のものである。

$$\text{If } (rain < rainLoss) \quad q_{add} = \alpha * (rain/rainLoss)$$

$$\text{If } (rain > rainLoss) \quad q_{add} = \alpha * (rainLoss/rainLoss) = \alpha$$

ここに $\alpha$ とrainLossは同定が必要なパラメタで $\alpha$ は係数である。シミュレーションで用いた $\alpha$ , rainLossの値をTable 1に示す。今回は、木津川流域以外は統一した値を用いても、観測地点での水位・流量を概ね再現できた。

### (4) 都市域での下水道の扱い

土地利用形態で都市と判断される範囲には一般には下水道が存在する。ただし、本稿のような広域モデリングで、下水道ネットワークを完全にモデル化するのは容易ではない。したがって、ここでは下水道の最大排水量を設定し、これをrainLossとすることにした。本稿では下水道を通じて河川に戻る流量は考慮していない。木津川流域を除いては、1997年8月5～7日の寝屋川流域の浸水実績図を参考に、浸水計算結果が実績を再現できるように最大排水量を設定している (Table 2 全体)。木津川流域については主要地点で計算流量が観測流量に合致するようにした。

Table 1 *RainLoss* (low, mid, high) and  $\alpha$  in forest area

Catchment name	Forest [mm/hr]	$\alpha$ [mm/hr]
Whole	40, 41, 42	7.65
Takayama	48, 49, 50	6.545
Murou	61, 62, 63	7.395
Hinachi	61, 63, 66	6.63
Nunome	61, 63, 65	7.31
Shorenji	59, 61, 63	8.5

Table 2 Drainage capacity of sewage in urban area and of other areas

Catchment name	Urban area [mm/hr]	Other areas [mm/hr]
Whole	30	10,15,20
Takayama	45	15,20,25
Murou	45	25,30,35
Hinachi	45	30,35,40
Nunome	45	20,25,30
Shorenji	50	20,25,30

### (5) その他地域での降雨損失

土地利用形態で森林、都市以外と判断される範囲については、降雨・浸透メカニズムが必ずしも分からないエリアが多いため、降雨損失のみを考慮する。損失値も各主要地点で、計算流量と観測流量が合致するように与える。

### (6) ダムモデル

比奈知、青連寺、室生、布目、高山、日吉、天ヶ瀬、日野川、姉川ダムの位置にそれぞれのダムによる洪水調節操作を組み込んだ。具体的には、各ダムでの制御開始洪水流量を設定しこれを超えた場合、余剰流量をダムで貯留し（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た。なお、後述の計算においてはダム操作は2009年10月7～8日の事例に即しているが、詳細は別報に譲る。

## 3. 洪水計算結果

Fig. 4に現在最大降雨（図中 shift）と将来最大降雨（図中 pgw）を用いて計算した枚方地点より上流の流域平均雨量ハリエトグラフを示す。現在最大では流域平均の最大時間雨量は28.8mm/hr、将来最大については44.8mm/hrであった。なお、ここでの枚方上流域（流域面積3209km<sup>2</sup>）には琵琶湖流域は含まれていない。広域流域平均で時間最大44.8mm/hrは大きな値である。Fig.4には流域平均雨量観測値（国土交通省提供）も示してある。Fig 4, 5にはこれらの現在最大降雨、将来最大降雨を淀川モデルに入力して計算した枚方地点での水位と流量をそれぞれ示す。各計算では、ダムがある場合と、仮にダムが無い場合の計算結果を示した。また、参考のためにT7916時の観測水位・流量（国土交通省提供）を示す。なお、モデルパラメタは最近の洪水に適合するようにチューニングしているのでT7916の再現計

算は実施していない。初期条件は2009年10月7～8日台風18号時のものとした。計算された最高水位、最大流量をTable 3に示す。

これにより、枚方地点水位が現在最大降雨では8.8m、将来最大降雨では11.4mに達した。1965年に降に設定された計画高水位は13.23m、計画高水流量は12000m<sup>3</sup>/sであるので、モデルに取り込んだ限りの現在の状況（ダム有）では、少なくとも枚方地点において、水位、流量とも計画高水位、計画高水流量を超えないという計算結果になった。なお、この結果は、河川計画に適用されているモデルを用いた計算では異なる結果になると考えられる。本稿の結果はこれまで入手できた限定的な水理・水文データを用いて実施した結果であり、今後も継続的にモデルの改良をしていく。

ダム操作については2009年10月7～8日に実施された操作と同様であるが、現在最大降雨については、ダムによる水位低減効果は0.1m、流量低減効果は138m<sup>3</sup>/sであった。木津川最上流部の幾つかのダムでのダム流入量が、設定した洪水流量に至っていないことや、洪水波の減衰などによりこの結果に至ったと考えられる。他方、将来最大降雨については、水位は0.9m、流量は2155m<sup>3</sup>/s低減した。

現在・将来最大降雨で内水浸水を計算した結果を淀川全域についてFigs. 6,7、寝屋川流域についてFigs 8,9に示す。前述したが寝屋川流域の1997年8月5～7日の浸水実績を参考に、木津川流域以外は下水道の最大排水能力を30mm/hrと設定している。したがって、都市域では降雨強度が局所的に30mm/hrを超えると、内水氾濫が生じることになる。道路冠水レベルである内水浸水深20cmを超えたのは、淀川流域全体で、現在最大降雨で76km<sup>2</sup>、将来最大降雨で164.75km<sup>2</sup>であった。

## 3. 結語

本研究では、石川ら（2012）の物理ダウンスケー

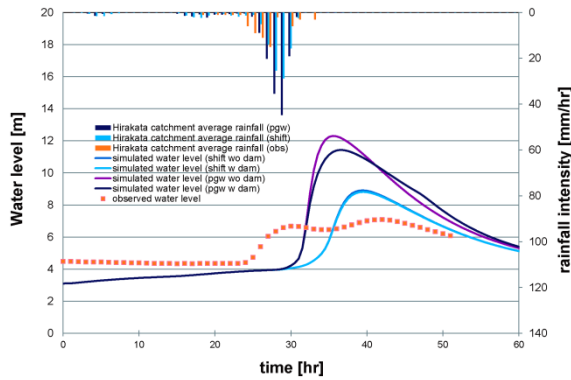


Fig. 4 Catchment average rainfalls above Hirakata, observed and simulated water levels at Hirakata with the present and future largest rainfalls

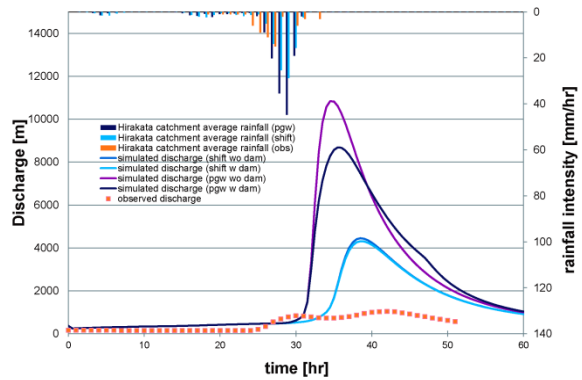


Fig. 5 Catchment average rainfalls above Hirakata, observed and simulated water discharges at Hirakata with the present and future largest rainfalls

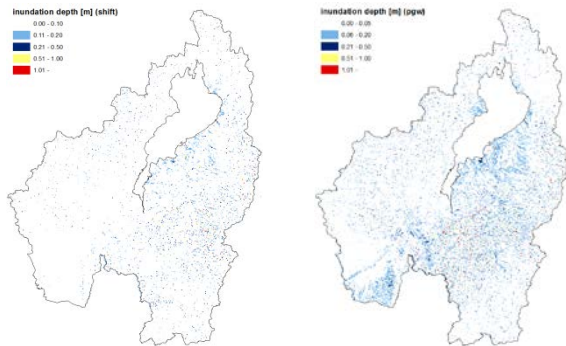


Fig. 6 Simulated inundation depth with the present largest rainfall (shift) Fig. 7 Simulated inundation depth with the future largest rainfall (pgw)

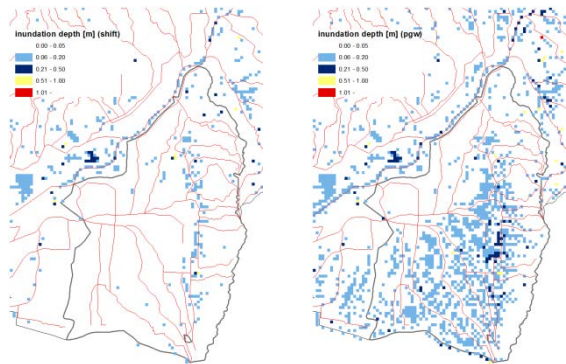


Fig. 8 Simulated inundation depth of Neyagawa river catchment with the present largest rainfall (shift) Fig. 9 Simulated inundation depth of Neyagawa river catchment with the future largest rainfall (pgw)

Table 3 Observed and simulated largest water level and discharge with the present and future largest typhoon

	T7916 Observation	With dams (shift)	Without dams (shift)	With dams (pgw)	Without dams (pgw)
Maximum water level [m]	7.1	8.8	8.9	11.4	12.3
Maximum discharge [m <sup>3</sup> /s]	2532	4319	4457	8684	10839

ル法による極端台風（降雨）を、小林ら（2012）による淀川分布型流出・氾濫モデルに入力し、淀川流域における極端洪水を推定する方法論を示した。現在・将来最大降雨を入力として、淀川河川計画の基準点である枚方地点での水位・流量を推定し、流域全体、特に寝屋川での内水浸水深を試算した。流出・氾濫モデルについては、水文・水理データの収集に時間がかかることもあり、検証が限定的であり、実際の河川計画モデルとの対応が必ずしも図れるものではないが、参考として計画高水位・流量な

どとの比較も示した。

実際に最悪のシナリオを考える場合には、高潮と洪水の同時生起による複合効果や、複数流域の同時氾濫、地震災害と洪水災害の同時生起など考え得るシナリオは多数ある。こうした最悪シナリオの想定は、市民、行政、様々な分野の専門家でも何度も検討を重ねることにより形づくられていくものである。本稿は主に河川洪水災害に着目したものであるが、最悪シナリオの検討の一助になればと考える。

## 謝 辞

国土交通省・近畿地方整備局，大阪府，大阪市，滋賀県には水文・水理データ，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，本稿の分布型降雨流出・洪水氾濫モデル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」を通して開発されたものです。NKSJリスクマネジメントの佐野 肇氏，津守博通氏，関井勝善氏に感謝申し上げます。

## 参考文献

寶 馨・端野典平 (2000)：レーダー雨量を用いたDAD解析と那珂川における可能最大洪水の推定，京都大学防災研究所年報，第43号B, pp. 167-176

奥勇一郎・吉野純・石川裕彦・竹見哲也・中北英一 (2010)：将来の極端台風の複数経路計算による可能最大被害予測，京都大学防災研究所年報，第53号B, pp. 371-375

石川裕彦・竹見哲也・奥勇一郎 (2012)：物理ダウンスケールによる極端台風による災害気象の評価，21世紀気候変動予測革新プログラム平成23年度研究成果報告書，pp.148-151

小林健一郎・寶 馨・佐野 肇・津守博通・関井勝善 (2012)：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，土木学会水工学論文集，第56巻, I-1069-I-1074

小林健一郎・寶 馨・佐野 肇・津守博通・関井勝善 (2011)：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，京都大学防災研究所年報，第54号B, pp.129-135

(論文受理日：2012年6月8日)

## A Deliberation of Extreme Flooding in Yodogawa River Catchment using the Outputs of Extreme Typhoon Experiment by Physical Downscaling

Kenichiro KOBAYASHI<sup>(1)</sup>, Yuichiro OKU<sup>(2)</sup>, Kaoru TAKARA, Hirohiko ISHIKAWA, Tetsuya TAKEMI and Eiichi NAKAKITA

- (1) Educational Unit for Adaptation to Extreme Weather Conditions and a Resilient Society, Kyoto University  
(2) Osaka City Institute of Public Health and Environmental Sciences

### Synopsis

This paper deals with a deliberation of extreme flooding in the Yodogawa river catchment using the outputs of an extreme typhoon experiment based on physical downscaling. First, Ishikawa et al (2012) has carried out the simulation to reproduce T7916 with weather model WRF (hereinafter control run). Then, they carried out the ensemble simulations by shifting the initial positions of the typhoons laterally from the control run (hypothetical typhoon (hyt) experiment). Finally, they add the future climate change bias on the simulation condition and carried out the pseudo global warming (pgw) experiment. The largest cumulative rainfall events extracted from the hyt and pgw experiment are given to the Yodogawa river distributed rainfall-runoff/flood inundation (DRR/FI) model and the Yodogawa river extreme flooding is deliberated. As the results, the highest water level at Hirakata simulated with pgw attains 11.4m (design water level: 13.23m). The inland inundation depth over 20cm by which the road is in general covered is simulated in wide range of the catchment. The results show the usefulness of the extreme flood simulations.

**Keywords:** distributed rainfall-runoff/flood inundation model, the Yodogawa river, extreme typhoon, extreme flooding, pseudo global warming experiment