

台風時の降雨量推定手法に関する研究

STUDY ON ESTIMATION METHOD FOR RAINFALL BY TYPHOONS

松本幸大¹・折池雄太²・鈴木久紀³・竹見哲也⁴・中北英一⁵
Kodai MATSUMOTO, Yuta ORIIKE, Hisanori SUZUKI, Tetsuya TAKEMI, Eiichi NAKAKITA

¹非会員 損害保険料率算出機構 リスク業務部
(〒163-1029 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワーN棟29階)

²非会員 損害保険料率算出機構 リスク業務部
(〒163-1029 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワーN棟29階)

³非会員 損害保険料率算出機構 リスク業務部
(〒163-1029 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワーN棟29階)

⁴正会員 理博 京都大学防災研究所准教授 気象・水象災害研究部門
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 工博 京都大学防災研究所教授 気象・水象災害研究部門
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In this study, we attempt to establish a method that can simultaneously estimate the wind speeds and basin average rainfalls for an enormous number of typhoons. We create by regression analysis an estimation equation to predict the rainfall induced by a typhoon from characteristics of the typhoon. To improve the estimation equation, we divide previous typhoons into four groups depending on the presence or absence of a front and the amount of rainfall. Since several groups don't have enough samples, we add WRF-simulated typhoons with the tracks perturbed from original tracks of the typhoons with large rainfalls. Owing to this process, we can create estimation equations taking account of the effects of typhoons that would cause catastrophes in the future. These equations well reproduce basin average rainfalls. We apply the equations to stochastically generated typhoons and estimate the rainfall for each basin. In this way, we establish a method that can simultaneously estimate the wind speeds and basin average rainfalls of typhoons for an arbitrary return period.

Key Words : Risk Assessment, Stochastic Typhoon Model, WRF, regression analysis, heavy rain, strong wind

1. はじめに

損害保険分野においては、長期間に及ぶ台風の風と雨による被害の同時評価を行い、低頻度・巨大災害のリスクを把握することが求められる。

数万、数十万個といった膨大な数の台風の風の評価は確率台風モデル（台風の発生から消滅までの台風の特性を確率論的に算出する統計モデル）等により可能である¹⁾。しかし、台風の雨の評価は地形性の考慮が困難であること等から、確率台風モデルのような手法による評価手法は確立されていない。また、領域気象モデルのWRF(Weather Research and Forecasting)を用いた台風の雨の評価は、一定数の台風数については可能であるが^{2),3)}、数十万個程度の膨大な数の台風については有効な手法と

は成り得ていない。

本研究では、アメダスの降雨量、既往台風とWRFによるシミュレーション台風（以下、WRF台風）のパラメータ（中心気圧低下量等）を用いて、流域平均雨量（以下、降雨量）を推定する式（以下、推定式）を作成する。推定式は統計的な手法である回帰分析を用いて作成するが、分析に用いるサンプルが僅少（統計期間が短い場合には、特に正確に評価したい低頻度・巨大災害に相当するサンプルが存在しないこともある）という統計的な脆弱性は、物理的手法であるWRFにより補うことで克服している（2章）。

当該推定式を確率台風モデルで発生させた台風（以下、仮想台風）に適用する（3章）ことで、最終的に膨大な数の台風の風速と台風時の降雨量を同時評価する手法の確立を試みる。

表-1 推定式の対象河川と降雨量算出時間と流域基準地点

対象河川名	計画降雨 継続時間	降雨量 算出時間	流域基準地点
利根川	3日間	72時間	八斗島
荒 川	3日間	72時間	岩淵
鶴見川	2日間	48時間	末吉橋
庄内川	1 日間	24時間	枇杷島
淀 川	24時間	24時間	枚方

表-2 ティーセン分割を行う雨量観測所

河川	雨量観測所
利根川	藤原, みなかみ, 片品, 草津, 沼田, 中之条, 田代, 榛名山, 前橋, 黒保根, 上里見, 伊勢崎, 西野牧, 藤岡, 神流, 奥日光, 足尾, 上吉田, 笠岳, 東御, 軽井沢, 北相木, 桧枝岐, 大湯, 塩沢, 湯沢
荒川	神流, 寄居, 熊谷, 上吉田, 鴻巣, 三峰, 秩父, 浦山, 練馬, 乙女湖, ときがわ, 鳩山, 飯能, さいたま, 越谷, 所沢, 小沢, 青梅, 北相木
鶴見川	府中, 世田谷, 相模原中, 日吉, 海老名, 横浜
庄内川	小原, 名古屋, 豊田, 伽藍, 恵那, 多治見
淀川	関ヶ原, 上石津, 柳ヶ瀬, 今津, 長浜, 朽木平良, 米原, 南小松, 彦根, 近江八幡, 東近江, 大津, 信楽, 土山, 美山, 須知, 園部, 京北, 京都, 長岡京, 京田辺, 能勢, 茨木, 枚方, 生駒山, 奈良, 針, 菅衛, 大宇陀, 北勢, 亀山, 上野, 笠取山, 名張, 白山, 今庄, 敦賀, 美浜, 小浜

表-3 推定式に使用する台風パラメータ等（説明変数）とその物理的意味の解釈

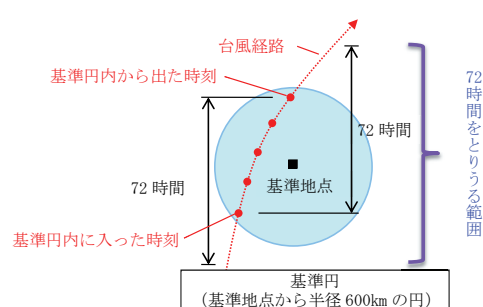
変数	説明変数 ()内は期待されるパラメータの符号, ()後は物理的意味の解釈
x_1	台風の中心が基準地点に最も近付いたときの距離 (-) 近いほど, 降雨量は大きくなる
x_2	台風の中心が基準地点に最も近付いたときの中心気圧低下量 (+) 大きいほど, 海面から吸い上げられ, 水蒸気の量が増し 降雨量雨量は大きくなる (+) 大きいほど, 風が強くなりやすく, 海面のみならず周辺からの水蒸気が集まりやすくなる
x_3	台風の中心が基準地点に最も近付いたときの台風の移動速度 (-) 遅いほど, 台風の滞在時間が長くなり 降雨量雨量は大きくなる
x_4	台風の中心が基準地点に最も近付いたときの最大旋衡風速半径 (+) 大きいほど, 広範囲に湿った風を供給しやすく 降雨量雨量は大きくなる
x_5	台風の中心が基準地点より南側に存在した時間 (+) 長いほど, 外側降雨帯が対象流域にかかる時間が長くなり 降雨量雨量は大きくなる

2. 推定式の作成法

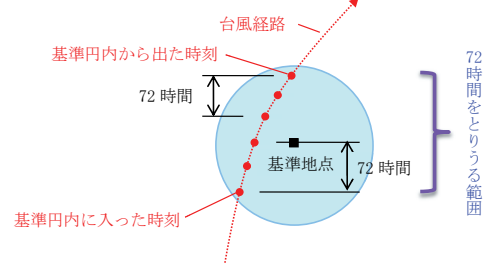
(1) 対象河川と台風の選定条件

本研究で確立した手法は、最終的に損害保険分野等でのリスク評価に利用することを考えている。そこで、資産が集積している三大都市圏に流域をもつ、利根川、荒川、鶴見川、庄内川、淀川の5河川を対象とし、推定式を作成することとした。

推定式の作成に使用する台風は、①1976年（アメダスデータが取得できる最初の年）から2013年までに発生し、②各河川の流域基準地点から半径600 km円内を通過した台風である。2点目の半径600 km円内については、台風の外側降雨帯が、台風中心の北側およそ200 kmから600 km円内に存在するため、これを設定している。



(a) 台風の中心が基準円内に存在した時間が72時間未満の場合



(b) 台風の中心が基準円内に存在した時間が72時間以上の場合

図-1 降雨量算出時間と台風と基準地点との位置関係

(2) 各河川における降雨量算出時間（応答変数）

表-1に推定式の対象河川と降雨量算出時間と流域基準地点を示す。降雨量算出時間は河川整備基本方針に記載の計画降雨継続時間を参考に設定した⁴⁾。なお、淀川の計画降雨継続時間は第70回河川整備基本方針検討小委員会の資料を参照している⁵⁾。

図-1に降雨量算出時間のイメージを、利根川（計画降雨継続時間3日間）を例に示す。72時間降雨量（降雨と被害の関連性を考慮する場合には日雨量より時間雨量が適切であると判断したため、降雨継続時間3日間を72時間と補正した。）の最大値を採用する。降雨量を検討する時間の範囲については、図-1 (a) 台風の中心が基準円内に存在した時間が72時間未満の場合と図-1 (b) 基準円内に存在した時間が72時間以上の場合で異なる。図-1(a)では基準円内から出た時刻から72時間前と基準円内に入った時刻から72時間後の間、図-1 (b) では基準円内に入った時刻と基準円内から出た時刻の間を、72時間を取りうる範囲としている。この範囲において、72時間降雨量をティーセン法により算出し、その最大値を各台風の降雨量としている。なお、降雨量は、表-2の雨量観測所でティーセン分割を行うことにより算出した。

(3) 推定式作成に使用する台風パラメータの選定（説明変数）

表-3に推定式作成に使用する説明変数を示す。これらの説明変数は、確率台風モデルの台風のパラメータから表現可能なものを、物理的意味、雨量との相関を考慮して選定した。変数 $x_1 \sim x_4$ については、「雨量算出時間中の平均値」を使用した場合も計算したが、統計的な当てはまりが良かった「基準地点に最も近付いたときの値」を採用した。

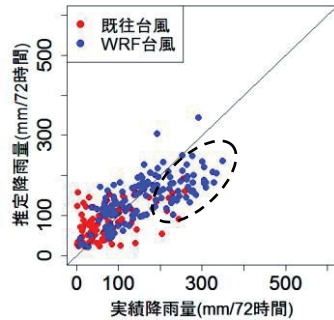


図-2 実績降雨量と推定降雨量比較（利根川）

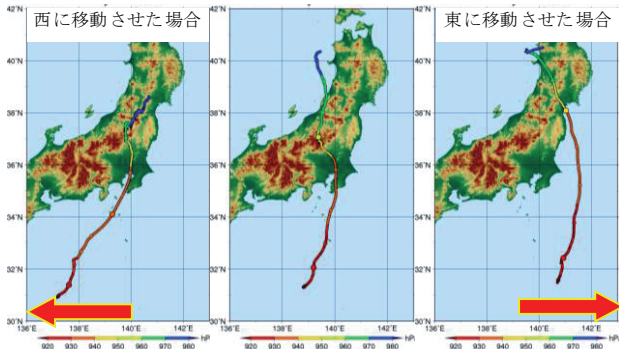


図-3 初期位置を移動させた場合の経路の違い

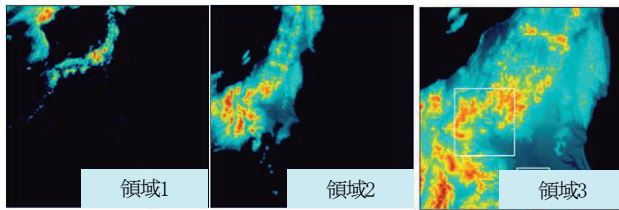


図-4 WRFの計算領域（東日本の場合）

降雨量に大きな影響を与えると考えられる地形性（地形の影響）については、説明変数として取り扱っていない。なぜならば、応答変数である降雨量が地形性を反映した値であり、河川別に推定式を作成することで地形性についても考慮できているからである。

なお、推定式作成に用いた変数は、気象庁のベストトラックデータを加工したものである。

(4) 推定式

(2)節、(3)節で設定した応答変数、説明変数を用いて、次の指数型の式を採用した（線形型等も考えられるが、当てはまりが良く、推定値が非負であることから指数型を採用）。

$$y = e^{a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5} \quad (1)$$

また、実績降雨量を重みとした重み付き最小二乗法により偏回帰係数を算定することで、降雨量の大きなデータについて、推定誤差が小さくなるようにしている。

図-2に実績降雨量と推定降雨量の比較結果を示す。推定式では、降雨量が大きな台風について、降雨量を過小

表-4 サンプル区分後のグループ

	小雨量	大雨量
前線有り	グループ2	グループ1
前線無し	グループ3	グループ4

表-5 WRFの設定

項目	設定等
物理過程	積雲：Kain-Fritch（領域1のみ） 雲物理：6種水物質（WSM6） 境界層乱流：ノンローカル混合（YSU）
初期値・境界値	米国環境予測センター（NCEP） Final Analysis（6時間毎、1度間隔）
計算領域（3重ネスト） 水平格子点間隔 格子点数	- 領域1（日本列島および南方海上） 9km・351×351 - 領域2（東日本または西日本） 3km・271×271 - 領域3（関東地方or淀川・庄内川流域） 1km・301×301 - 鉛直格子数：52

表-6 WRFによるシミュレーション台風追加前後の台風数

河川	WRF台風追加前（個）	WRF台風追加後（個）
利根川	100	236
荒川	92	229
鶴見川	88	225
庄内川	99	259
淀川	109	268

評価する傾向を示している（丸囲みの部分が過小評価）。これは、実績降雨量を重みとして使用しているものの、サンプル数の多い小雨量台風に回帰結果が引きずられ、大雨量台風の推定降雨量が小さくなってしまったためである。

そこで、推定式作成に使用する台風データ（以下、サンプルという）を、①台風襲来時の前線の有無、②降雨量の大小により4区分し、表-4で示す各グループで推定式を作成することで、降雨量の推定精度向上を図った。

(5) WRFを用いたシミュレーション台風の追加

サンプルを区分することで、推定式作成に使用する各グループのサンプルが少なくなり、作成した推定式の統計的な信頼性が損なわれてしまうことが危惧される（場合によっては、サンプルの不足のため、推定式の作成が不可能になる）。そこで、図-3に示すように、WRF⁶⁾により、既往台風の渦位を保存した状態で、初期位置を移動させることにより、複数のWRF台風を作成し、サンプルに追加した^{2),3)}。表-5にWRFの設定を、図-4にWRFの計算領域を、表-6に各河川において、WRF台風を追加する前後の台風数を示す。WRF台風の追加により、サンプルの拡充による、統計的な信頼性の向上という目的だけでなく、将来大規模災害を引き起こしうる台風もサンプルに含んだ推定式とした（統計的手法の短所を、物理的手法により補強）。なお、WRF台風の降雨量について、メッシュ単位での雨量の計算は可能であるが、データの均質性という観点から、既往台風と同様にティーセン法で計算した。

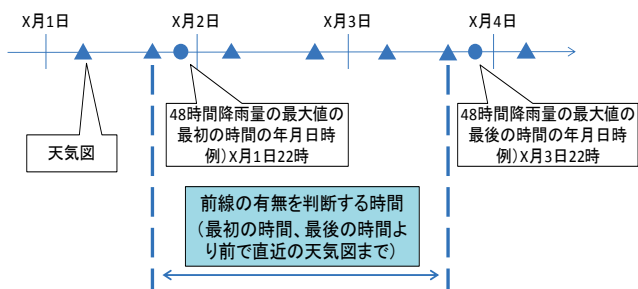


図-5 前線の有無を判定する期間

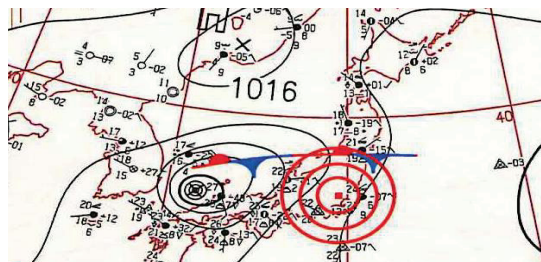


図-6 前線の有無の判定例 (荒川)

(6) グループ分けの方法と設定した分類基準 (前線の有無と降雨量の大小による分類)

各河川の流域基準地点から半径100 km, 200 km, 300 kmの円内に前線がかかっているか否かを天気図から判定する。使用したデータは、気象庁の天気図であり、1976年から1995年までは一日2枚 (9時, 21時), 1996年から2013年までは一日4枚 (3時, 9時, 15時, 21時) である。

図-5に天気図を確認する期間を示す。降雨量算出時間の最初の時間、最後の時間より前で直近の天気図までの期間を確認する。図-6に荒川において、前線の有無を判定した例を示す。この例では、半径300 kmと設定した場合では前線有り、半径100 km, 200 kmと設定した場合は前線無しとなる。

次に、降雨量の大小の閾値 (以下、閾値雨量) よりも降雨量の大きな台風を大雨量台風、そうでないものを小雨量台風とすることで、サンプルを更に2つのグループに区分する。その際、各河川の閾値雨量は、当該河川の実績降雨量の最小値から最大値までの間を5 mm/(降雨継続時間) 間隔で複数設定した。

以上のようにして複数設定した、前線の有無を判定する半径と閾値雨量の中からMSE (平均二乗誤差) が最小となる組合せを探索した (計算法の詳細は付録参照)。

この方法により、前線の有無を判定する半径と閾値雨量について、前者は5河川すべてにおいて300 kmを採用した。後者は利根川で170 mm/72時間、荒川で265 mm/72時間、鶴見川で150 mm/48時間、庄内川で100 mm/24時間、淀川で125 mm/24時間を採用した。

なお、WRF台風の前線の有無は、シミュレーションの基とした既往台風の前線の有無と同一とした。

3. 確率降雨量の算出法

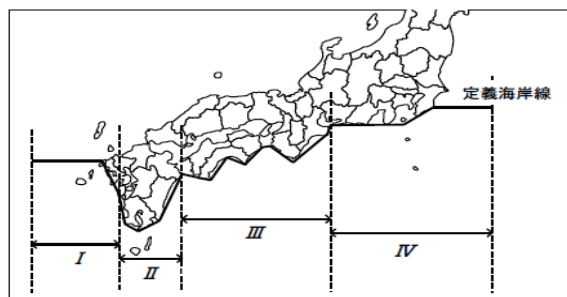


図-7 定義海岸線

表-7 台風の特性の確率分布

台風の特性	確率分布	作成区分
年間上陸・接近数 (個)	ポアソン分布	エリア別 (4区分)
上陸位置 (経度・緯度)	一様分布	エリア別 (4区分)
中心気圧低下量 (hPa)	対数正規分布	エリア別 (4区分)
最大旋衡風速半径 (km)	対数正規分布	中心気圧低下量別 (3区分)
進行速度 (km)	対数正規分布	エリア別 (4区分)
進行方向 (deg)	対数正規分布	エリア別 (4区分)

(1) 確率台風モデルの概要¹⁾

本研究の推定式を適用する対象は仮想台風である。気象庁のベストトラックデータと地上気象データを加工したものをを用い、以下の方法により仮想台風を作成する。

まず、台風の経路により、台風の特性に違いがあると考えた。そこで、日本列島の南岸を中心とする海岸線を平滑化して17の直線としたものをモデル上の海岸線として定義し (以下、定義海岸線)、定義海岸線を4つのエリア (I ~ IV) に区分し、それぞれの区分で台風の特性を統計学的に分析し、台風の特性の確率分布を推定した。図-7に定義海岸線を、表-7に台風の特性の確率分布を示す。次に、表-7の分布に従った乱数を発生させることで、任意の年数の仮想台風を発生させることができる。

この仮想台風それぞれにつき、風速算出式^{7,8)}を適用することにより、台風の風の評価を行うことができる。

(2) グループ分けの方法

仮想台風を以下の方法により、表-4で示した4つのグループに分類した。

確率台風モデルで使用している台風パラメータには前線の有無についての情報はないため、仮想台風の前線の有無を統計データから確率的に推定した。推定手順について、まずサンプル (WRF台風は含めない) における、前線有り台風と前線無し台風の台風数およびそれらの割合を求める。次に計算した割合に従ったベルヌーイ試行によって、各仮想台風の前線の有無を推定する。つまり、各仮想台風は他の仮想台風とは独立に確率 p (前線有り台風数 ÷ 全台風数) で前線有り台風、確率 $1-p$ で前線無し台風に分類される。

次に、前線の有無により2つの区分に分類した仮想台風を統計的手法により大雨量台風と小雨量台風に分類した。分類する統計的手法には、推定式作成に用いる説明

表-8 河川ごとの標準化偏回帰係数

	グループ	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
利根川	1	5.51	-0.03	0.03	-0.03	-0.04	0.05
	2	4.25	-0.25	0.06	0.04	-0.08	-0.04
	3	4.06	-0.53	0.02	0.23	0.02	0.51
	4	5.32	-0.02	0.06	0.12	0.00	-0.08
荒川	1	5.91	-0.06	0.00	0.01	-0.01	-0.02
	2	4.71	-0.29	0.17	0.11	-0.07	0.15
	3	4.62	-0.59	0.11	0.18	0.03	0.17
	4	5.78	-0.08	0.09	-0.05	0.08	-0.08
鶴見川	1	5.33	-0.07	0.01	-0.03	-0.04	-0.09
	2	4.41	-0.30	0.05	-0.01	-0.11	0.04
	3	3.95	-0.55	0.07	-0.03	0.04	0.09
	4	5.46	-0.28	0.20	0.08	-0.11	-0.44
庄内川	1	4.85	0.03	-0.03	0.07	-0.04	0.14
	2	3.84	-0.25	0.08	0.00	-0.05	0.05
	3	3.41	-0.55	0.02	0.08	0.13	-0.02
	4	5.03	0.10	-0.06	-0.05	-0.08	0.00
淀川	1	5.15	-0.03	0.05	0.00	0.00	0.00
	2	4.03	-0.25	0.08	0.05	-0.07	-0.03
	3	3.61	-0.40	0.09	-0.28	0.41	-0.07
	4	5.38	-0.26	0.08	-0.08	-0.18	0.32

変数を用いた判別分析（大雨量台風と小雨量台風の降雨量の等分散性を仮定しない，マハラノビスの距離による分類）を用いた。

(3) 確率降雨量の算出法

(2) 節の統計的手法により，4つの区分に分類した仮想台風に，それぞれの区分の推定式を適用することで，仮想台風の降雨量を算出した．これらを年最大値に変換し，降順に並び替えることで，毎年データによる確率降雨量を求める．上からn番目の確率降雨量について，年超過確率「 $n \div$ シミュレーション年数」という形式で，任意の再現期間の確率降雨量を求める，ノンパラメトリックな算出法である（本研究では，シミュレーション年数は100,000年とした）．

4. 結果と議論

(1) 作成した推定式と既往台風の再現結果（2章の結果）

表-8に説明変数を正規化し，前線の有無を判定する半径と閾値雨量を用いて，推定式を作成したときの標準化偏回帰係数を示す．多くのグループで a_1 （台風の中心が基準地点に最も近付いたときの距離のパラメータ）の絶対値が大きいため，このパラメータが降雨量に大きく影響していると考えられる．表-3に記載の期待される符号と逆符号の係数も存在するが，これは他のパラメータより影響が小さいため，調整項のような役割となったためではないかと考えられる（多重共線性がないことは確認した．）．

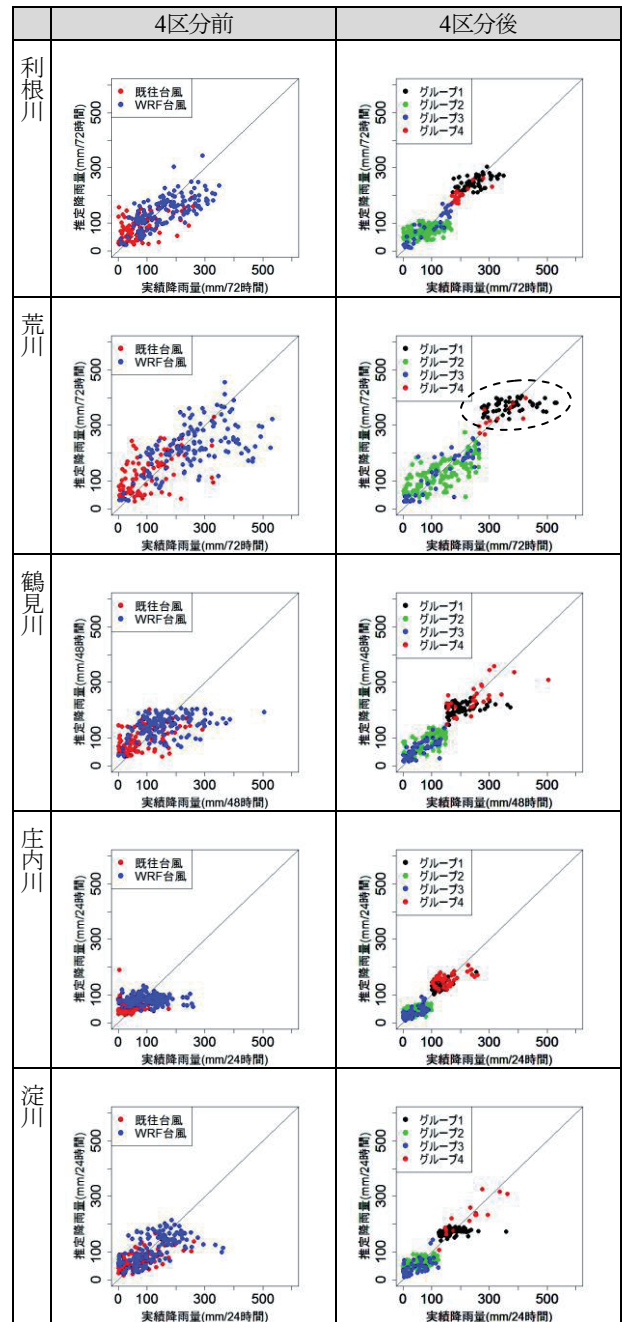


図-8 推定降雨量と実績降雨量（4区分前後）

図-8に4区分前後の推定降雨量と実績降雨量の比較結果を示す．これより，4区分することで推定精度が向上した（45度線にプロットが近づいている）ことを確認できた．しかし，荒川の右列（4区分後）の丸囲みで示すように，グループ1の推定降雨量に精度向上の余地があると考えている（グループ1が45度線にのっていない．推定降雨量の増加に対して実績降雨量の増加が緩やかである．）．

(2) 確率降雨量の算出結果（3章の結果）

表-9に推定式で求めた各河川の確率降雨量を示す．河川整備基本方針の確率降雨量をベンチマークとするなら

表-9 推定式で求めた確率降雨量と河川整備基本方針に記載の確率降雨量の比較

再現期間 (年)	利根川降雨量 (mm/72時間)		荒川降雨量 (mm/72時間)		鶴見川降雨量 (mm/48時間)		庄内川降雨量 (mm/24時間)		淀川降雨量 (mm/24時間)	
	推定値	基本方針	推定値	基本方針	推定値	基本方針	推定値	基本方針	推定値	基本方針
300	271	—	398	580	238	—	205	—	519	—
200	268	319	395	548	236	441	199	376	469	261
150	266	290	393	525	236	405	193	—	417	—

ば、淀川以外の河川については、確率降雨量は過小に評価されている、淀川については過大に評価されている。淀川以外の河川については、大雨量を算出すると予想されるグループ1（前線有り・大雨量台風）およびグループ4（前線無し・大雨量台風）において、(1)節で述べたように、大雨量の推定精度が十分でないためだと考えられる。

(3) 推定式の精度向上のための検討

本研究での推定式では、現在のところ大雨量台風の降雨量の再現性について、改善の余地がある。確率降雨量の推定精度の向上のため、大雨量台風の属するグループ1、グループ4について、降雨量と相関の高い変数を見つけることが課題であると考えている。

今後検討を行う変数としては、強風半径や暴風半径（最大旋衡風速半径の代替）、台風の経路（追加）等を考えている。

5. まとめと今後の予定

アメダスの降雨量、既往台風とWRF台風のパラメータを用いて、回帰分析により推定式を作成した。分析に使用するサンプルが不足する場合には、WRF台風を追加しており、統計的に信頼性が損なわれる部分を物理的手法で補強する手法となっている。当該推定式により、実績降雨量を概ね再現できた。

推定式を確率台風モデルで発生させた仮想台風に適用し、確率降雨量を推定した。推定降雨量は淀川以外の4河川では過小評価、淀川では過大評価であるため、精度向上のための検討が今後必要である。

まだ検討すべき課題があるが、確率台風モデルにおいて、膨大な数の台風の降雨量を簡易に推定する手法の枠組みを構築することができた。

本研究で示した手法の確立後には、確率台風モデルで発生させた台風の風と雨による被害の同時評価を行う。台風の風による被害は、風速算出式と被害関数（風速と被害率の関係式）により評価する予定である。台風の雨による被害は、本研究で作成した推定式により算出した確率降雨量を洪水氾濫シミュレーションの入力降雨とし、計算した浸水域、浸水深と被害関数（浸水深と被害率の関係式）により、被害を評価する予定である。

謝辞：本研究は損害保険料率算出機構にて開催された平成23・24年度災害科学研究会風水害部会にて研究した成果を基に、当該部会の終了以降に精査を進めているものである。本研究に際し、御協力して下さった部会委員各位および（株）パシフィック・コンサルタンツ社に、この場を借りて感謝の意を表します。

付録

各河川に対して、前線の有無を判定する半径と閾値雨量を設定する。この設定した半径と閾値雨量に基づいて、サンプルを4つのグループに区分する。各区分について推定式を作成し、それぞれの区分ごとに台風の推定降雨量を求める。ここで、 i 番目のサンプルの実績降雨量を y_i とし、推定降雨量を $\hat{y}_i$ と表すことにする。当該河川におけるサンプル数を N とすると、MSEは次式である。

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

参考文献

- 1) 損害保険料率算出機構: モンテカルロシミュレーションを利用した台風の風速分布の算出, 2001
- 2) Oku, Y., J. Yoshino, T. Takemi, and H. Ishikawa: Assessment of heavy rainfall-induced disaster potential based on an ensemble simulation of Typhoon Talas (2011) with controlled track and intensity, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 14, pp. 2699-2709, doi:10.5194/nhess-14-2699-2014, 2014
- 3) Ishikawa, H., Y. Oku, S. Kim, T. Takemi, and J. Yoshino: Estimation of a possible maximum flood event in the Tone River basin, Japan caused by a tropical cyclone, Hydrological Processes, Vol. 27, pp. 3292-3300, doi: 10.1002/hyp.9830, 2013
- 4) 国土交通省水管理・国土保全局: 河川整備基本方針, 2015
- 5) 第70回河川整備基本方針検討小委員会, 2007
- 6) Skamarock et al.: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, 2008
- 7) 藤井健, 光田寧: 台風の確率モデルによる強風のシミュレーション, 日本風工学会誌, No. 28, pp. 1-12, 1986
- 8) 孟岩, 松井正宏, 日比一喜: 中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性 その2 台風時の強風, 日本風工学会誌, No. 66, pp. 3-14, 1996

(2015. 4. 3受付)