室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

近年発生した極端豪雨に対する数値予報降雨の適用性について

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 土木学会 公開日: 2019-03-13 キーワード (Ja): 降雨予測, 数値気象予測モデル, 極端豪雨 キーワード (En): GSM, MSM, Rainfall forecast, Numerical weather forecast model, GSM, MSM, Extremely heavy rainfall 作成者: 沖, 岳大, 中津川, 誠 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009755

近年発生した極端豪雨に対する数値予報降雨の適用性について

CLARIFYING THE ACCURACY OF NUMERIC RAINFALL FORECASTS TO EXTREMELY HEAVY RAINFALL EVENTS

沖　岳大[1]・中津川 誠[2]
Takehiro OKI，Makoto NAKATSUGAWA

[1]正会員　工修　北電総合設計株式会社　技術研究所（〒060-0031　札幌市中央区北1条東3丁目1番地1）
[2]正会員　工博　室蘭工業大学大学院工学研究科　教授（〒050-8585　室蘭市水元町27-1）

In recent years, refinement in the accuracy of rainfall forecasting has been called for in Japan because of extremely heavy rainfalls that have occurred in various areas. For dam operation in particular, accurate rainfall forecasting would be greatly beneficial in allowing for the release of water prior to a forecast heavy rainfall event, which would make it possible to increase water control and water use capacities. Comparison of the cumulative rainfall forecasts calculated by using the numerical weather forecast models, GSM and MSM, with actually measured rainfall revealed that the accuracy of the two models was good for long period rainfall events such as those caused by typhoons. The accuracy of the MSM rainfall forecast for localized heavy rainfall that occurs in a short period was also found to be good. A calibration method, which can be used in disaster mitigation and dam operations, was suggested thorough clarification of the error ranges of rainfall forecasting.

Key Words : *Rainfall forecast, Numerical weather forecast model, GSM, MSM .*

１．はじめに

近年，気温，降雨，降雪などにおいて極端な気象現象が顕著である．特に降雨については，時間雨量が100mm/hを上回る降雨が頻発し，河川の氾濫，土砂災害などこれまで経験したことが無い現象への対応に迫られている．これらの外力の変化は，地球温暖化による要因とも考えられ，IPCC第5次評価報告書で，地域ごとに対応した「適応策」の重要性が指摘されている．

一方で我が国のエネルギー供給は，東日本大震災の津波被害以降は主に火力発電により補われているが，火力発電は燃料コストが高いこと，二酸化炭素を多く排出することから環境面で課題がある．そこで，豪雨，エネルギー供給の両面で有効な対策として，洪水調節や水力発電の機能を有するダムの有効活用がある．具体的には，ダムに流入する流量を予測雨量から推定し，事前に放流することで，洪水調節や水力発電の機能を向上できる方法が考えられる．

以上より本研究は，将来的に降雨予測情報の幅広い活用を見据えて，近年の日本全国で発生した極端な豪雨（既往最高を記録するような）の速報値をまとめ，降雨予測の精度を明らかにすることを目的とし，今後の防災情報の提供，ダム管理支援の適用の可能性を示す．

これまで，降雨予測を適用した洪水調節や水力発電に関する研究として，林下ら[1)]が北海道の金山ダムを例に，数値気象予報モデルによる予測雨量の精度評価を行い，補正した雨量で弾力的運用のシミュレーションを示している．また，臼谷ら[2)]は積雪地域にあるダムを対象に，降雨予測を用いて，ただし書き操作を回避する方法を提案している．また，下坂ら[3)]は既存ダム貯水池の洪水調節機能向上に関して，利水容量の安全性に配慮した実務に即した事前放流の方法を提案している．また海外では*Mearns*ら[4)]は数値気象予報の精度について留意点を紹介している．研究手順を以下に示す．

1) 近年発生した極端な豪雨から，台風事例，低気圧事例，局地豪雨事例を網羅するよう選定した．対象年は，数値予報降雨が利用可能となった年以降とした．なお，対象とした流域面積は，局地豪雨のスケールを勘案し，概ね10^1～10^2(km^2)のオーダーとした．
2) 予測雨量は，地球全体の大気を対象とした気象庁の数値予報モデルGSM（Global Spectral Model）[5)]と，

日本近海を対象とした気象庁の領域モデル MSM（Meso Scale Model）[5]を適用した．具体的な予測降雨の検証方法は，まず予測値と実績値の相関係数を比較した．次に積算雨量の時系列の評価から避難情報との関係を調べ数値予報降雨の精度を確かめた．

3) 積算予測雨量に対する積算実績雨量にガンマ分布を当てはめ予測雨量の誤差範囲を求め，防災対策やダム等の施設運用に適用するために数値予測降雨の補正方法を提示した．

2．研究方法

(1) 対象降雨の概要

対象降雨は，近年発生した極端な豪雨（既往最大を記録したような降雨）を対象とした．対象降雨の内訳は，局地豪雨が４事例，台風が３事例，低気圧のもたらす大雨が１事例と様々な降雨要因が含まれるようにした．

図-1，**表-1**に対象降雨の概要[6),7),8),9),10)]及び位置図を示す．表は，降雨の要因ごとに色分けをしている．なお，降雨名称は本論文内における略称である．

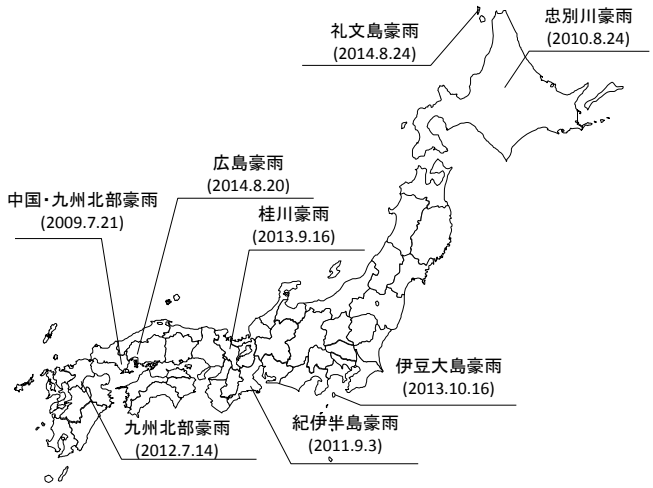

図-1 対象流域事例の位置図

(2) 対象流域

対象流域の諸元を**表-2**に示す．流域面積は，局地豪雨のスケールを勘案し，概ね10^1～10^2(km^2)オーダーに設定し，ダム流域や土砂災害発生領域とした．観測雨量は，流域内にある雨量観測所を選定し，水文水質データベース（国交省）とアメダス（気象庁）を用いた．流域平均雨量は，局所的な流域では雨量観測点が少ないために簡便的に算術平均により算出した．

(3) 予測雨量データ

予測雨量データは，気象庁の数値予報モデルGSM（Global Spectral Model）[5]と，日本及びその近海を対象とした気象庁の領域モデルMSM（Meso Spectral Model）[5]を適用した．GSM，MSMのメッシュ解像度やリードタイム（以降LTと表記する）を**表-3**に整理した．

表-2 各流域・領域の観測地点と流域面積

	洪水名称	流 域	流域面積 km^2	雨量観測所
1	中国・九州北部豪雨	土砂災害発生領域	10.5	真尾、防府
2	忠別川豪雨	忠別ダム流域	238.9	忠別ダム、湧駒別、旭岳、松山、小化雲岳
3	紀伊半島豪雨	猿谷ダム流域	336.0	猿谷、天辻、柞原、九尾、川迫、虻峠
4	九州北部豪雨	日向神ダム流域	84.3	吹原、鯛生
5	桂川豪雨	日吉ダム流域	290.0	殿田、周山、鎌倉
6	伊豆大島豪雨	土砂災害発生領域	91.1	大島、大島北ノ山
7	広島豪雨	土砂災害発生領域	9.9	高瀬
8	礼文島豪雨	土砂災害発生領域	81.0	礼文島、沓形、本泊

※1)中国・九州北部豪雨は、土砂災害発生領域として真尾川、久兼川流域とした。
※2)九州北部豪雨は、日向神ダム流域内のデータがないため、近傍の観測点で平均している。
※3)礼文島豪雨は、土砂災害発生領域をカバーするため、利尻島観測点も使用している。
※4)礼文島・伊豆大島豪雨はアメダスデータ、その他は水文水質データベースである。

表-3 数値予報モデルの概要

	GSM（全球モデル）	MSM（メソモデル：日本海域）
水平解像度	約 20 km	約 5 km
リードタイム	84 時間	33時間(UTC：03, 09, 15, 21) 18時間(UTC：00, 06, 12, 18)
予報時間	1日4回（6時間間隔） (UTC：00, 06, 12, 18)	1日8回(3時間間隔) (UTC：00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21)
鉛直層数	14 層	16 層
出力データ	海面更正気圧，地上気圧，風向・風速，相対湿度，雲量，降水量	
配信期間	2007.11～現在	2006.3～現在

表-1 予測降雨の検証に用いた極端豪雨の概要

	年月日	降雨名称	発生要因	災害概要
1	2009.7.21	中国・九州北部豪雨	線状降水帯（梅雨前線）	平成 21 年 7 月 20 日～21 日に発生した梅雨前線よる局地豪雨で，線状降水帯が発生した．防府市の特別老人養護施設の土砂災害が発生した．防府市では，死者が 14 名，山口県内で 159 件発生した．
2	2010.8.24	忠別川豪雨	線状降水帯（低気圧）	平成 22 年 8 月 23 日～24 日に発生した低気圧による局地豪雨で，線状降水帯が発生した．石狩川支川の忠別ダム上流では，道路橋が陥没し死者 3 名，忠別ダム上流の天人峡温泉にいた約 300 名が孤立した．
3	2011.9.3	紀伊半島豪雨	台風12号	平成 23 年 9 月 1 日～4 日に発生した台風 12 号による豪雨で，台風が大型で動きが遅く長時間の豪雨であった．この豪雨により，深層崩壊型の土砂災害が発生し，紀伊半島では死者行方不明者は 84 名に及んだ．
4	2012.7.14	九州北部豪雨	線状降水帯（梅雨前線）	H24 年 7 月 13 日～14 日に発生した梅雨前線による局地豪雨で，線状降水帯が発生した．矢部川水系など 10 河川で既往最高水位突破し，矢部川では破堤が生じた．福岡，熊本，大分の3県の死者行方不明者は 34 名に及んだ．
5	2013.9.16	桂川豪雨	台風18号	平成 25 年 9 月 15 日～16 日に発生した台風 18 号による豪雨である．由良川，桂川などで越水が発生し約 2,000 戸の浸水被害が発生した．特に，桂川は嵐山で浸水被害が生じ，浸水面積は 10ha，京都府内の死者は無かった．
6	2013.10.16	伊豆大島豪雨	台風26号	平成 25 年 10 月 15 日～16 日に発生した台風 26 号による豪雨である．伊豆大島では，山地の中腹で土砂崩壊が生じ大規模な土石流が発生した．死者行方不明者が 39 名に及んだ．
7	2014.8.20	広島豪雨	線状降水帯（秋雨前線）	平成 26 年 8 月 19 日～20 日に発生した秋雨前線による局地豪雨で，線状降水帯が発生した．広島県安佐南区・北区で土砂災害が発生した．50 箇所以上で土石流で発生し，74 名が亡くなる未曾有の災害となった．
8	2014.8.24	礼文島豪雨	低気圧	平成 26 年 8 月 23 日～24 日の発生した低気圧による豪雨である．礼文島では少なくとも 10 か所以上の土砂崩れが発生し，トンネルをふさぐ被害や道路が寸断された．この土砂災害により2名が亡くなった．

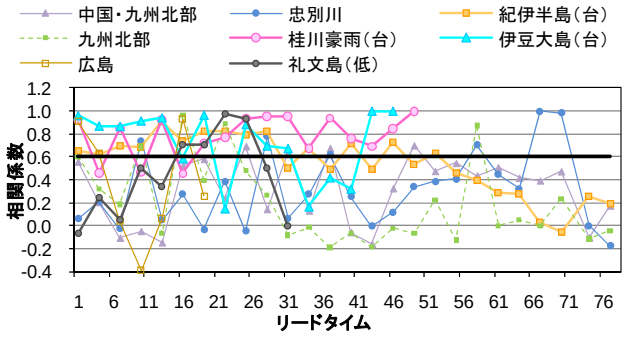

図-2　GSMの相関係数（時系列値）

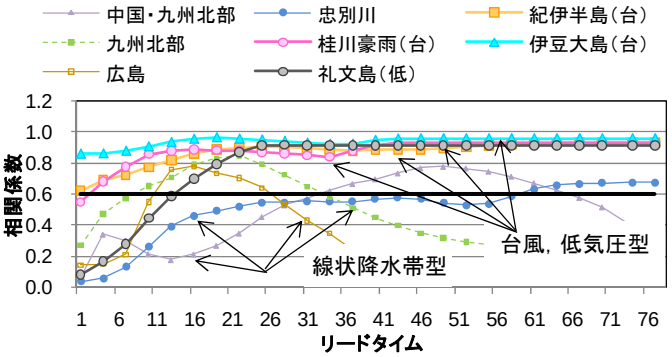

図-3　GSMの相関係数（積算値）

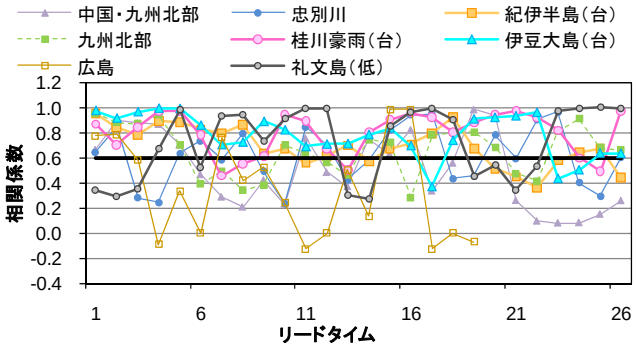

図-4　MSMの相関係数（時系列値）

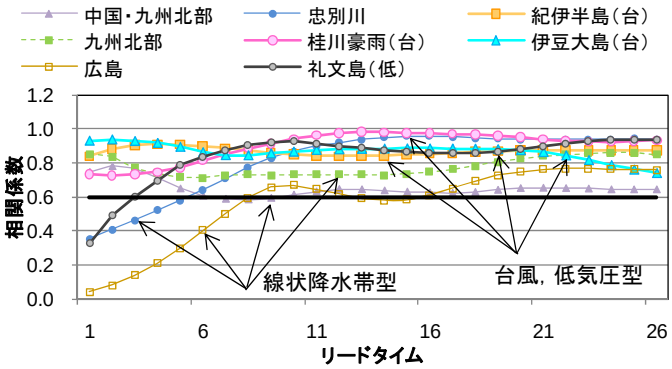

図-5　MSMの相関係数（積算値）

３．結果と考察

(1)　リードタイムの延長に伴う相関係数

GSMとMSMで予測された予測値と実績値の比較は，相関係数を指標として，時系列値および積算値のそれぞれについて行った．時系列値の相関係数は，予測降雨と実績降雨について同時刻の降雨を抽出して算出する．積算値の相関係数は，例えばLT24の積算値の場合は，まず予測降雨のLT1～24を積算する．次に予測降雨のLT1～24と同時刻分の実績降雨を抽出して積算する．最終的には，積算した予測・実績降雨を１日４回の配信データごとに並べて整理し，共分散や標準偏差から相関係数を算出した．GSMにおける相関係数の結果について時系列値を**図-2**に，積算値を**図-3**に示す．**図-2**及び**図-3**は，図の見やすさから3時間間隔のデータとしている．

結果を見ると，GSMの時系列値（**図-2**）の相関係数は降雨によりバラツキがある．一方，積算値の相関係数（**図-3**）は，忠別川，紀伊半島，伊豆大島，礼文島豪雨で概ね0.8以上である．これらは，台風や低気圧型の降雨であり相関係数が高い傾向を示したと考える．一方，中国・九州北部，忠別川，九州北部，広島豪雨は相関係数が低い．これらは，降雨が線状降水帯型であり，GSMによる降雨予測が難しかったと推察する．次にMSMにおける相関係数は，時系列値を**図-4**に，積算値を**図-5**に示す．時系列値の相関係数（**図-4**）は，降雨によりバラツキがある．一方，積算値の相関係数（**図-5**）は，LTの延長により全ての降雨で0.6以上を示し良好である．特に，線状降水帯型の中国・九州北部豪雨，忠別川豪雨，九州北部，広島豪雨の精度がGSMより向上している．これは，GSMとMSMで計算方法の違いに加え，GSMが約20kmメッシュで計算されているのに対して，MSMが約5kmメッシュで計算され空間解像度が高いことが要因と考える．

(2)　積算雨量の時系列での評価

災害発生までに数値予報降雨が実用できたかを検証するため，**図-6**に積算予測雨量の時系列グラフを整理した．**図-6**は，MSMによる積算予測雨量が積算実績雨量に対してどの程度の予測降雨であったかと，実際に発令した防災情報（大雨警報，土砂災害警戒情報，避難勧告，避難指示）より以前でどの程度予測ができていたかを見るために示した．ここでの積算予測雨量は，災害発生の24時間前，12時間前の予測2ケースを示している．また防災情報は，気象庁の災害時気象速報[11),12),13),14,15)]などを参考にして把握できた範囲で入れた．**図-6**からわかることは，例えば紀伊半島豪雨や桂川豪雨では，災害発生の24h前に概ね実績の積算雨量を予測できており，つまり災害情報より前に定量的な予測が概ねできていることである．同様に忠別川豪雨，伊豆大島豪雨，礼文島豪雨の予測についても過小傾向だが積算実績雨量の増加勾配に近い予測結果となっている．しかし，中国・九州北部豪雨，広島豪雨は予測が難しかったことがわかる．これらの降雨予測の活用に向けては予測誤差の範囲を推定し，安全を考慮して何倍すればよいかを検討する必要がある．

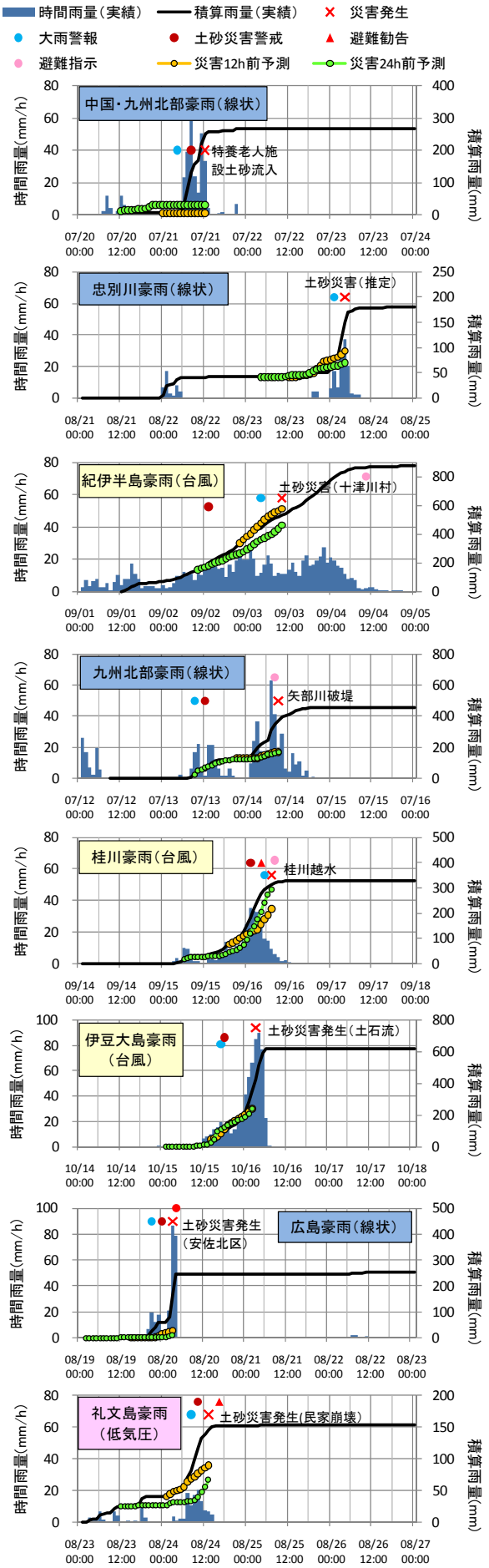

図-6　積算予測雨量と避難情報の関係

(3)　予測・実績雨量の分布図

ここでは2つのLTを例にして実績雨量と予測雨量の分布図を図-7，図-8に示し，2のLTの特徴や適用性を調べた．ここで，LT24，LT12のそれぞれの意味合いは，LT24はダムの事前放流等への適用を想定したLTであり，ダム水位の低下時間や関係機関との調整に要する時間と考えた．LT12は洪水予測や土砂災害情報などの防災情報への適用を想定したLTである．補足すると，LT12は例えば広島豪雨のような深夜3時の豪雨の場合，前日15時の予測で避難情報として適用可能なLTである．

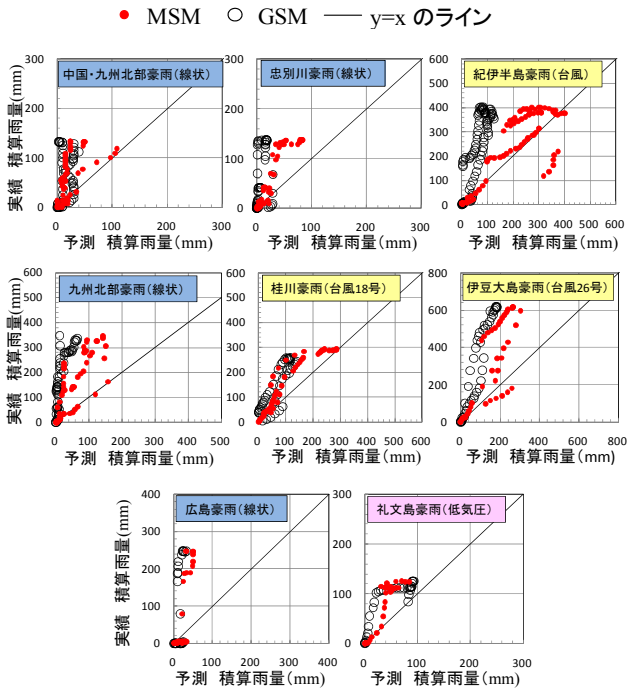

図-7　予測雨量と実績雨量の分布（LT24）

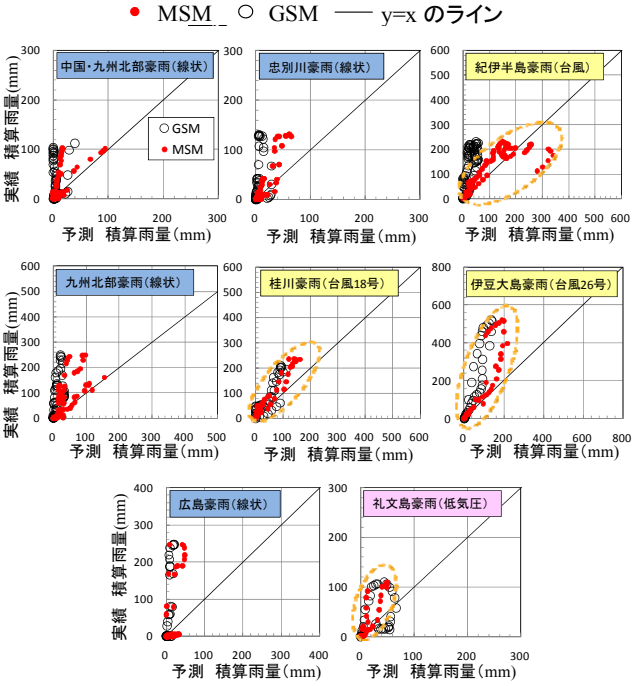

図-8　予測雨量と実績雨量の分布（LT12）

図-7のLT24の分布図は，概ね実績雨量が150～400mmの範囲の雨量になる（伊豆大島は除く）．全体的に予測値が過小傾向である．特に，GSM（凡例黒）の中国・九州北部，忠別川，九州北部，広島豪雨で過小予測の傾向が顕著である．一方，MSM（凡例赤）は，$y=x$のライン上にプロットが現れ精度が改善方向にある．図-8のLT12の分布図は概ね100～250mmの範囲の雨量になる（伊豆大島を除く）．全体的に過小である予測傾向はLT24と同様であるが，紀伊半島，桂川，伊豆大島，礼文島豪雨の台風低気圧型では一定の勾配（関係）があり，誤差を補正すれば洪水予測，土砂災害発生リスクの判定に適用できると考える．

(4) 積算予測雨量の誤差範囲の推定

積算予測雨量の誤差範囲の推定方法[2]は，GSM，MSMのそれぞれについて以下の流れで行った．以下の説明番号と図-9内の番号は対応している．

① 全ての降雨について，積算予測雨量を0～10mm，10～20mmのような階級別のヒストグラムにする．
② 予測雨量に対応する実績雨量に対して，ガンマ分布を当てはめて最頻値を求める．
③ 実績雨量の70%出現範囲を算出する．これは台風の中心が予報円に入る確率が70%であることを参考とした．
④ 70%の出現範囲について，回帰式からGSM，MSMの誤差範囲を推定する．

ここで，積算実績雨量に当てはめたガンマ分布曲線は，以下の式で表される．

$$f(x)=\frac{\beta^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}\exp^{\beta x} \quad (1)$$

$$\alpha=\frac{\mu^2}{\sigma^2}\quad,\quad \beta=\frac{\mu}{\sigma^2} \quad (2)$$

ここで，$f(x)$：ガンマ分布の確率密度関数，$\Gamma(\alpha)$：ガンマ関数，α：形状母数，β：尺度母数，μ：平均値，σ^2：分散を示す．

実積積算降雨の最頻値は次式で算出する．

$$x=\frac{\alpha-1}{\beta} \quad (3)$$

さらに，積算実績雨量の70%の範囲については，(1)式の確率密度関数$f(x)$を積分し，上下限の15%を除けばよいので以下の(4)式で算出できる．

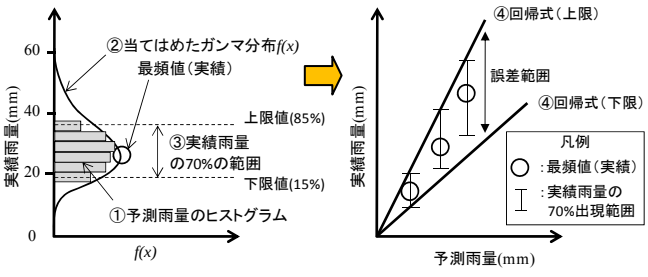

図-9 予測雨量の誤差範囲の推定方法

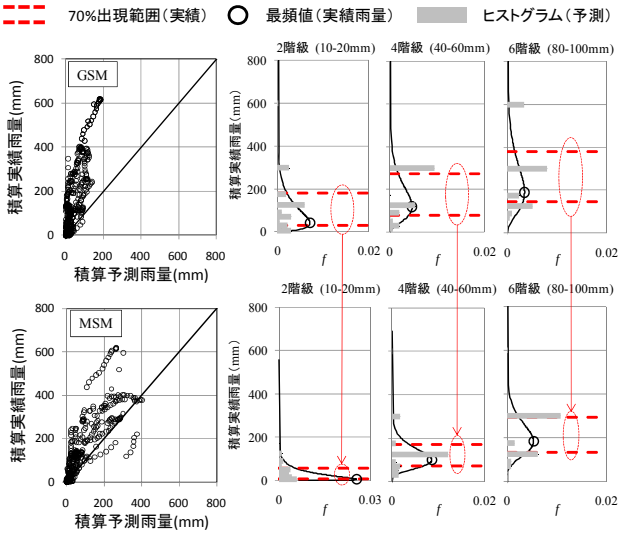

図-10 予測雨量の分布 及び ヒストグラムの例

（上段：GSMのLT24，下段：MSMのLT24を示す．それぞれの左図：実績と予測の分布図，右の３図は，黒曲線：積算実績雨量のガンマ曲線，○：積算実績雨量の最頻値，赤点線：積算実績雨量の70%出現範囲，棒グラフ：積算予測雨量のヒストグラム）

$$\text{下限値：}\int_0^{r_{\min}} f(x)=0.15\ ,\ \text{上限値}\int_0^{r_{\max}} f(x)=0.85 \quad (4)$$

図-10より，2つのことがわかる．１点目は，GSM，MSMともに，雨量の階級が大きくなると（ヒストグラムの３つのグラフを右へ見ていく）と，実績雨量の70%出現範囲が広くなるので，雨量が増えると精度が低下する点である．２点目は，MSMの70%出現範囲はGSMに比べ狭くなり精度が向上している点である．

次に，積算予測雨量に対する実績雨量の70%出現範囲の回帰式を図-11，図-12に示した．図-11，図-12では，全てのデータを扱い分析した場合を黒い凡例，台風低気圧型のデータ（紀伊半島，桂川，伊豆大島，礼文島豪雨）で分析した場合を赤い凡例で示している．その結果，全てのデータで見た場合，LT24のGSM（図-11左）は回帰係数の幅が2.0～4.5倍と幅があるのに対して，LT24のMSM（図-11右）では1.1～2.9倍で狭くなり予測精度が向上している．また，LT12（図-12）の場合もLT24の結果と同様にMSMで予測精度が向上している．特に，MSMのLT12については，台風低気圧型で見れば0.9～1.9倍と最も狭くなり精度が高いことがわかった．以上より，全ての降雨型および台風低気圧型について予測誤差の範囲を推定できた．

最後に，回帰係数を幅α_wがα_w=1.0～1.5の範囲は◎，α_w=1.5～2.0の範囲は○，α_w=2.0～3.0の範囲は△と定義し，降雨予測の適用性を表-4にまとめた．表-4よりMSMについては予測精度が高く，防災情報や施設運用などへの幅広い適用性を確認した．一方，GSMは今回の極端豪雨については精度が低い傾向にあり，台風低気圧型の要因に限定した活用とし，防災情報の適用につい

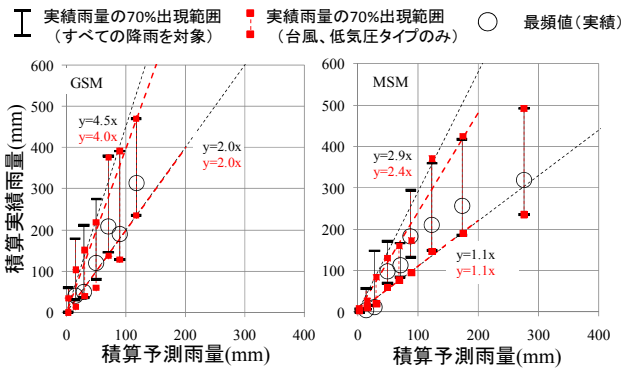

図-11　LT24の積算予測雨量に対する積算実績雨量の出現範囲（左：GSM，右：MSM）

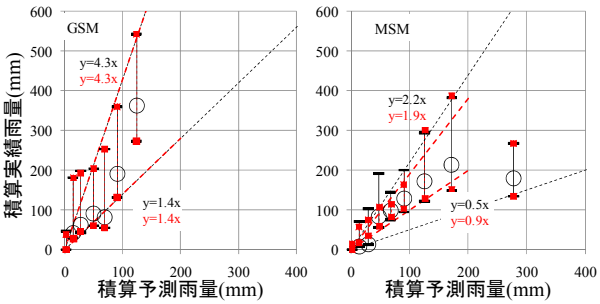

図-12　LT12の積算予測雨量に対する積算実績雨量の出現範囲（左：GSM，右：MSM）

表-4　回帰係数の幅と適用性

	GSM 全てのデータ	GSM 台風・低気圧のデータ	MSM 全てのデータ	MSM 台風・低気圧のデータ
ケース：LT24（施設運用の適用を想定）	△	○	○	◎
	$\alpha_w = 2.5$	$\alpha_w = 2.0$	$\alpha_w = 1.8$	$\alpha_w = 1.3$
ケース：LT12（防災情報の適用を想定）	△	△	○	◎
	$\alpha_w = 2.9$	$\alpha_w = 2.9$	$\alpha_w = 1.7$	$\alpha_w = 1.0$

※ 台風低気圧型の回帰式は，積算雨量200mm以下を対象とした．

ては慎重な取り扱いが必要である結果となった．

4．まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる．

1) 近年の大災害をもたらした事例を対象に2種類の数値気象予報モデル（GSM，MSM）で計算された予測雨量を比較し，LTの延長に伴う相関係数の検討から，積算予測雨量の有効性を提示した．
2) 積算雨量の時系列での評価から，積算予測雨量の精度は，台風など長時間降るような降雨については概ね良好であり，短時間で局地的に降る降雨についてもMSMが活用できる可能性があることを示した．
3) 実績雨量のヒストグラムにガンマ分布を当てはめ，予測雨量と実績雨量の誤差範囲を示し，防災対応やダムの操作等に活用するための補正方法を提示した．具体的には，防災対応では2.2倍（台風低気圧型の場合は1.9倍），ダム等の施設運用については2.9倍（台風低気圧型の場合は2.4倍）の誤差補正をすることで適用できる可能性を示した．

今後の研究目標は，数値予報降雨の補正についてさらに精度を高め，流出解析や洪水・氾濫一体モデルの入力値として活用するなどして，リードタイムを活かした防災情報の提供や，ダムなどの施設運用の改善を図ることに役立てたい．また，今後の地球温暖化等により極端化する降雨に対応するダム操作の方法（例えば事前放流）や，水力発電の増電に向けたシミュレーションの研究を進めたいと考える．

参考文献

1) 林下直樹，中津川誠：降雨予測リードタイムの延長による多目的ダムの弾力的管理の向上，土木学会論文集B，Vol.70，No.4，I_1471-I_1476，2014.
2) 臼谷友秀，中津川誠：積算予測雨量に基づいた融雪期におけるダムの洪水調節機能の向上について，土木学会論文集B，Vol.66，No.3，268-279，2010.
3) 下坂将史，呉修一，山田正，吉川秀夫：既存ダム貯水池の洪水調節機能向上のための新しい放流方法の提案，土木学会論文集B，Vol.65，NO2，106-122，2009.
4) Mearns，L.O.，F.Giorgi，P.Whetton，D.Pabon，M.Hulme，and M.Lal：Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments，IPCC TGCIA，pp.1-38，2003.
5) 地球流体電脳倶楽部HP, *http://dennou-h.gfd-dennou.org/*
6) 清水康行：2010年北海道豪雨災害調査報告，河川災害に関するシンポジウム，pp.9-23，2011.
7) 角哲也，竹林洋史：2011年台風12号に伴う紀伊半島の災害概要と総合土砂管理への課題，河川災害に関するシンポジウム，pp.15-24，2012.
8) 土木学会九州北部豪雨災害調査団，平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書，pp.1-45，2013.
9) 竹林洋史：2013年9月京都・滋賀水害調査報告，河川災害に関するシンポジウム，PP.19-24．2014.
10) 清水義彦：台風26号(平成25年10月16日)による伊豆大島豪雨災害調査報告，河川災害に関するシンポジウム，PP.25-30．2014.
11) 気象庁：災害時気象速報 平成21年7月中国・九州北部豪雨，pp.1-44，2009.
12) 旭川地方気象台：平成22年8月13日から14日の大雨に関する気象速報，pp.1-9，2010.
13) 気象庁：平成23年台風12号による8月30日から9月5日にかけての大雨と暴風，pp.1-79，2011.
14) 福岡管区気象台:災害時気象速報 平成24年7月九州北部豪雨，pp.1-36，2012.
15) 広島地方気象台：成26年8月19日から20日にかけての広島県の大雨について，pp.1-10,2014.

(2014. 9. 30受付)