

1-11 気候変動と流量計画支援に関する調査

研究予算 : 運営費交付金 (治水勘定)
研究期間 : 平 11~平 14
担当チーム : 水工研究グループ (水理水文)
研究担当者 : 吉谷 純一、深見 和彦

【要旨】

各水系での河川整備基本方針および整備計画策定を支援する各種解析の開発が求められている。本研究では、このような河川計画を支援するために、気候変動の影響の評価および最大洪水流量推定に関連する各種解析、模型実験を行い、各種解析に有用なプログラムの開発を行った。また、その結果をインターネットで公開した。
キーワード : 気候変動、確率降雨、水文統計、メソスケール大気モデル、地球温暖化、タンクモデル、森林

1. はじめに

各水系での河川整備基本方針および整備計画策定を支援するための各種解析の開発が求められている。本研究では、河川計画を支援するために、気候変動の影響の評価および、最大洪水流量推定に関連する各種解析を行った。

初めに、既往の文献調査により、気候変動と降雨特性の長期変動に関する客観的な評価を試みた。次に、過去の全国アメダス降雨データを用いて確率降雨量を算定し、その結果をインターネットに公開した。また、ソースコードの公開を前提とした水文資料の統計処理計算ライブラリを設計・構築し、また、その利用にあたってのドキュメントを整備した。

次に、可能最大降水量の検討するに供するように、気象現象をシミュレートできるメソスケールモデルを開発し、過去の豪雨事例を対象に再現計算を実施し、モデルの有効性について検討した。さらに、地球温暖化際計算においては、地球温暖化の地域的な影響予測のためにモデルを開発し、これによって地域的な気候変化を計算し、日本各地の水利用への影響を予測し、またその評価を行った。また、タンクモデルの正しい使用方法に関する検証計算を実施した。また、主に森林のもつ保水機能の限界等の現象を視覚的に表現するため、山腹斜面の降雨流出現象を模擬できるモデルを製作し、降雨と流出の関係について検討を行った。

2. 研究方法

2.1 降雨特性の長期変動に関する既往研究調査

過去のデータに基づいた降雨特性について長期変動に関する既往の研究、文献を調査することにより、降雨特性の長期変動に関する評価を試みた。この際既往の研究結果を時間スケール、空間スケール別に分類し、データの統計期間とあわせて整理し、評価した。

2.2 アメダス観測点における確率降雨の算定

確率統計解析に最低限必要と考えられる 20 年間以上の年最大値が得られるアメダス観測点を対象とし、確率降雨量を算定した。この際、統計処理上、全観測期間に渡って同一の条件下でデータが取得されていることが条件となることから、最初に、記録されているアメダス観測データの品質検査を行い次に、統計学上有意なデータを対象に、8 種類の降雨継続時間($t = 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72$ 時間)の毎年最大雨量を算出し、毎年最大値の中の最大値(既往最大雨量)を抽出して、その降雨強度と発生日を求めた。

アメダスデータの品質検査及び処理で得られた毎年最大雨量データから、各降雨継続時間での確率降雨量を計算し結果を整理した。確率再現年は 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50 年の 7 種類とした。採用する確率分布形 (母数推定法の種別含む) は、表-1 の 12 種類とした。

各観測地点、各降雨継続時間の毎年最大値データから各確率分布形の母数を求める際には、(財)国土技術研究センターから配布されている「水文統計ユーティリティ Ver. 1.4」を利用し、このユーティリティで計算不能であったデータセットに関しては、そのまま計算不能として取り扱うものとした。

また、各確率分布については、SLSC 値および相関係数を計算し、上記の結果とあわせて整理した。

表-1 採用確率分布形及び母数推定法一覧

略称	確率分布形(母数推定法)
LN	対数正規分布 2 母数 (積率法)
LNLM	対数正規分布 2 母数 (L 積率法)
LN3PM	対数正規分布 3 母数 (積率法)
LN3Q	対数正規分布 3 母数 (クォンタイル法)
GEV	一般化極値分布
Exp	指数分布 (L 積率法)
Gumbel	グンベル分布
IshiTaka	石原・高瀬法
Iwai	岩井法
SQRTET	平方根指数型最大値分布
LogP3	対数ピアソンⅢ型分布 (対数空間法)
LP3RS	対数ピアソンⅢ型分布 (実数空間法)

確率降雨量算定で求められた母数を元に SLSC 値と相関係数の計算を行い、各確率分布形の適合度調査をした。加えて Jackknife 計算を行ない安定度について調査を行なうとともに、参考として既往最大雨量の過大・過小評価比の計算を行い、理論比との比較をした。

適合度調査は、各標本について計算された SLSC 値および相関係数を確率分布毎に平均し、その平均 SLSC 値、平均相関係数値を比較することとした。安定度調査も同様に、確率分布毎の平均推定誤差偏差から行った。

以上の結果から確率降雨量推定に用いる確率分布を選択し、次の処理対象とした。既往最大雨量の過大・過小評価比の計算では、確率降雨量算定で求められた同降雨継続時間の既往最大雨量を、確率紙上にプロットングポジションを用いてプロットし、この既往最大降雨量のとる非超過確率を持つ曲線上の値を計算し、既往最大降雨量と比較する事で、その確率曲線における既往最大データ値の過大・過小評価を行った。

以上の結果を総合的に考慮して、確率降雨強度式算定に利用する確率分布形を決定した。

処理対象となったアメダス観測地点について、簡単に降雨の確率解析を行なう事ができる確率降雨強度式を算定した。確率降雨強度式としては、フェア式を使用した。

パラメータ算出に用いる確率降雨量は、各確率分布に関する適合度及び安定度の調査において選択さ

れた確率分布形のものを採用することとした。また、元の確率雨量と、フェア式を用いて得られた確率雨量を比較するため、全地点のデータを用いて降雨継続時間、確率年毎に散布図を作成し評価した。

以上の本解析結果はホームページで公開した。本ホームページにアクセスすることにより、確率降雨算出 Excel マクロプログラムをダウンロードでき、誰でも簡易に全国アメダス観測地点の確率降雨量を算出することができるようにした。

2.3 水文統計ライブラリの構築

アメダス観測地点における確率降雨量算定で使用した「水文統計ユーティリティ」は、簡便な操作を想定しているため、ソースコードの公開は行っていない。また、現在、ソースコードまで公開したその様なプログラムは存在しない。そこで、様々な確率分布形の母数推定、確率量算定を行なう機能を有し、ソースコードの公開を前提とした水文資料の統計処理に有用な計算ライブラリを設計・構築することとし、利用のためのドキュメントも整備した。対象とする確率分布形は、各種文献^{1)~3)}に記載されている主要 14 分布形(表-1 で示した分布計+正規分布、ピアソンⅢ型分布)とした。使用言語は Fortran とし、可能な限り Fortran90 仕様に従うものとした。

2.4 メソスケール大気モデルによる豪雨の再現

気象条件を入力とし出力として降雨を計算できる大気水文統合モデル(Integrated Regional Scale Hydrological/Atmospheric Model: IRSHAM)を開発し、那須川、阿武隈川を氾濫させた 1998 年 8 月末豪雨の再現計算を試みた。

2.5 地球温暖化再計算

地球温暖化の地域的な影響予測のために開発したモデルにより、地域的な気候変化を計算し、日本各地の水利用への影響予測に用いることができるように予測結果を整理・評価した。また、地球温暖化際計算で得られたメッシュ毎及び地域区分にごとに月単位での計算降水量平均値と標準偏差を整理し、今後の流域水利用への温暖化影響研究に生かすことができるよう数値データをホームページに公開した。

2.6 タンクモデルのパラメータ設定に関する検討

昨今、ダム流域における洪水流出計算に、タンクモデルを間違った理解に基づき使用している場合が見受けられる。本研究では、タンクモデルの正しい使用を促すため、モデルのパラメータ設定に関する幾つかの検討を実施した。

最初に、ひとつの洪水を再現計算するためのパラ

メータについて、幾つかの極端な値を設定し、解が複数通り存在するかを確認した。次に、そのひとつの洪水に対して設定したパラメータを使用して、同流域の他洪水をうまく再現できるかを検証した。

検討対象流域は、過去 30 年間以上に渡って精度の高い水文観測を実施している土木研究所裏筑波流出試験地 ($A=3.12\text{km}^2$; 図-1) とした。本検討に用いたタンクモデルの構造を図-2 に示す。

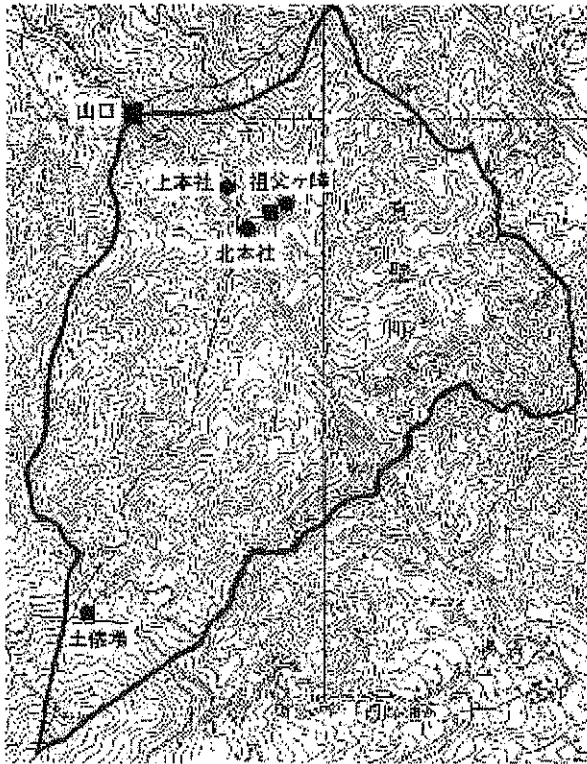


図-1 土木研究所裏筑波流域試験地流域

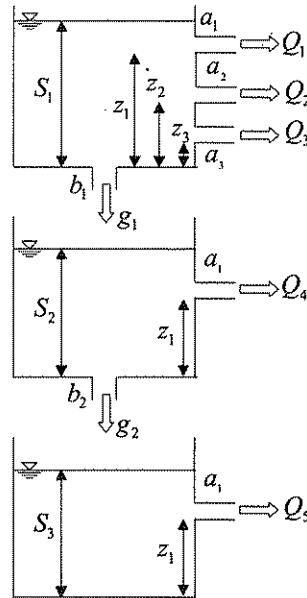


図-2 検討に使用したタンクモデルの構造

3. 研究結果

3. 1 降雨特性の長期変動に関する既往研究調査

過去のデータに基づいた既往の研究結果を整理した結果を表-2 に示す。これより、時間データを用いた解析は、1970 年代から今日までの約 30 年の期間に対して行われたものであり、それ以前の期間に対しては日降水量での解析がおこなわれていることがわかる。これらの研究の対象時空間スケールをわかりやすくまとめたのが表-3 である。表-2 にまとめた既往の研究結果から日本の降雨の変動傾向に関して共通的に言えることは、

- ・日本の年降水量は減少傾向にあること、
- ・年々変動幅は増大傾向にあること
- ・大雨頻度、大雨強度は増加傾向に見えること
- ・北日本海側および近畿、九州から中国地方の日本海側では、大雨頻度・強度ともに減少傾向にある。

表-2 降雨特性の長期変動に関する既往の研究

	時間スケール	地域スケール	統計期間	状況	研究者
*1	時間降水量	東京	1979-1994	4月～9月、12時～18時の降水量が周辺に比べて相対的に多い。	藤部, 1998
*2	時間降水量	都心	1976-1997	降雨強度の強い雨が増加している。	佐藤・高橋, 2000
*3	時間降水量	首都圏	1976-1997	■10mm/hを越える降水の割合は、1990年代に入り50%にまで増加している。 ■特に東京23区から横浜にかけて、強い降水の割合が増えている。	佐藤・高橋, 2000
*4	時間降水量	日本1300箇所	1990-2001	100mm/h以上の年間延べ件数が近年増加傾向。	河川局資料
*5	時間降水量	日本全国	1980-1999	■九州～中国地方の日本海側では減少傾向。 ■九州～四国の太平洋側斜面や中部山岳地域の南側斜面、東北、北海道で豪雨時の雨量が10%以上増加。	飯村・木村, 2001
*6	日降水量	23区	1950-1970	大雨日数(31mm以上)が多摩地域に比べて大幅に増加。	Yonetani, 1982
*7	日降水量	北日本海側、近畿地方	1961-2000	大雨頻度、強度ともに減少傾向。	磯部, 2001
*7	日降水量	関東、九州地方	1961-2000	大雨頻度、強度ともに増加傾向。	磯部, 2001
*8	日降水量	日本24地点	1900-1999	■豪雨頻度は増加傾向にある。 ■全降雨に占める豪雨の割合の増加。	梶原・沖・松本, 2002
*9	冬	中部地方	1954-2000	降雪量が減少している。	中部地整資料
*10	年降水量	前橋	1897-1996	1960年～突然少雨になり始めた。	米谷
*11	年降水量	中部地方	1900-2000	顕著な少雨や多雨が多くなり、年々変動が大きくなっている。	中部地整資料
*12	年降水量	日本51地点	1899-2001	年降水量平年比が100年あたり約6%の減少トレンドを示している。1970年代以降、極端な少雨が増えている一方、極端な多雨年も発生するなど、変動幅が大きくなっている。	気象庁「気候変動監視レポート2001」
*13	年降水量	日本46地点	1899-2001	明治30年からのデータでは、減少傾向にある。また、年々変動が大きくなっている。	気象庁「気候変動監視レポート2001」
*14	年降水量	日本全国	1899-2001	年々変動が大きくなっている。	河川局資料
*15	年降水量	日本37箇所	1901-2000	100年間の年降水量から、特に最近25年間の、暖候季における分散は以前に比べると有意に増加している。	山元ら, 2002
*16	年降水量	全球	1880-2000	陸上の降水量は全体で20世紀中に約2%増加した。	気象庁「気候変動監視レポート2001」

表-3 既往研究一覧(時空間スケール分類)

		時間スケール			
		1時間	1日	冬	1年
地域スケール	1地点				1897-1996(*10)
	東京	1979-1994(*1,*2)	1950-1970(*6)		
	首都圏	1976-1997(*3)			
	各地方		1961-2000(*7)	1954-2000(*9)	1900-2000(*11)
	日本	1990-2001(*4) 1980-1999(*5)	1900-1999(*8)		1899-2001(*12,*13,*14) 1901-2000(*15)
	全球				1880-2000(*16)

※表中の数字は、解析の行われた統計年を示す

※(*印数字)は表-1の概要と対応している。

3. 2 アメダス観測点における確率降雨の算定

3. 2. 1 アメダスデータの品質検査及び処理

1)アメダスデータの品質検査

アメダス観測地点には、それぞれ地点番号及び名称がつけられているが、観測位置の移動などにより、同一の地点名称を持っていても地点番号が異なる観測地点や、地点番号、地点名称が同一であっても観測位置が移動している観測地点が存在する。統計処理上、できるだけ長期間の観測データが得られる事が望ましいが、アメダス観測地点の位置の移動があった場合には、移動前の降雨データと継続したデータとして取り扱って良いかどうか判定する必要がある。気象庁では、1998年に、統計の接続可否に関する通知(気象庁観測部長、1998)⁴⁾を出し、これに従ってデータの取り扱いを行っている。これによると、観測要素のうち一つでも統計的に接続できないと判断された場合、異なる地点番号が用いられることになる。アメダス観測要素のうち降雨量データのみを対象としており、地点番号が異なるからと言って、必ずしも降雨量データが統計的に接続できないという事を意味しているわけではないが、記録されたアメダスデータからこれを判断するのは不可能なため、観測地点位置の移動などがあった場合の取り扱いについては、気象庁の取り扱いに従うこととした。すなわち、同一の観測地点名称であっても観測地点番号が異なる場合は異なる地点とし、統計処理の際に連続した降雨データとして扱わないこととした。また、地点位置に変更があっても観測地点番号が同一の場合は連続した降雨データとして取り扱うこととした。この取り扱い方法に従い、1976年から2000年までのアメダスデータから、単純に地点番号の異なる地点を全て抜き出した結果、1,595個の地点番号が得られた。

次に、1,595地点の観測状況について調査を行った。全ての地点において、1976年から2000年まで観測が行われているわけではなく、またそれぞれの地点のデータには、欠測などが存在する場合もある。この時、欠測数によっては、毎年最大値を算定するのに十分なデータ数が得られない標本である場合も考えられる。また、観測年数が短い観測地点では、得られる毎年最大値が少なくなるため、統計処理を行う上で問題となる。このため本研究では、各地点の各観測年について毎年最大値を算出可能かどうか調べ、さらに、統計解析に最低限必要と考えられる20年以上の毎年最大値が算定可能な地点を今後の処理

対象地点とすることとした。

毎年最大値が算出可能かどうかの判定では「水文観測業務規程(建設省河川局、2000)」⁵⁾における最多 t 時間降水量の算出方法に従い、以下のルールを適用した。

・1日の時間降水量に欠測がある場合には日降水量は欠測とする。

・1月のうち、欠測日数が3日以内である場合には、月降水量を求める。4日以上の場合には、月降水量は欠測とする。

・1年間の月降水量に欠測がある場合には、最多 t 時間降水量は欠測とする

これに従い、20年以上の最多 t 時間降水量が求められない地点を除外した結果、全1,595地点中、756地点が以降の処理対象として選択された。

2)年最大降雨の算定

抽出されたアメダス観測地点のデータを用いて、各観測地点における各降雨継続時間の年最大値と生起日時を算出した。ここで降雨継続時間として1, 2, 3, 6, 12, 24, 48, 72時間の8種類を採用した。

ここで、処理の過程で得られた各地点の1時間降雨量の中で、「アメダス観測年報2000年版」に収録されている各地点の極値・順位データの第1位値よりも大きな値を持つデータが存在した。極値・順位データは、各年のアメダス観測年報データを元に異常値などのチェックを行なった上で作成されているため、これを超えるデータは各年のアメダス観測年報の収録ミスと考えられる。よって、本研究では、極値・順位データよりも大きな1時間降雨量データが現れた場合、そのデータは欠測値として扱う事とした。この結果、756(地点数) \times 8(降雨継続時間数)=6,048個のデータセットが得られた。例を表-3に示す。

さらに各地点、各降雨継続時間の毎年最大値の中で最大の降雨量を既往最大降雨とし、降雨強度と降雨量に分け生起日時と共に整理した。一部を例として表-4に示す。ただし、この既往最大降雨は「水文観測業務規程」に適合した年の年最大降雨から選択しているため、他の気象記録の既往最大降雨と一致しない場合がある。

表-3 毎年最大降雨まとめの例(1時間降雨)

地点番号	地点名称	生起日時	降雨強度	生起日時	降雨強度	生起日時	降雨強度
11001	宗谷岬	----/--/-- --:--	-999.000	1979/10/27 17:00	8.000	1980/10/18 1:00	13.000
11121	沼川	1978/8/4 8:00	15.000	----/--/-- --:--	-999.000	----/--/-- --:--	-999.000
11151	脊形	1978/8/14 10:00	32.000	----/--/-- --:--	-999.000	1980/7/24 3:00	15.000
11176	豊富	1978/8/14 11:00	37.000	1979/1/28 16:00	24.000	1980/10/18 1:00	16.000
11206	浜頓別	1978/9/26 7:00	17.000	1979/9/14 16:00	13.000	1980/6/18 2:00	12.000
11276	中頓別	1978/8/14 7:00	23.000	1979/10/20 1:00	20.000	1980/10/6 5:00	18.000
12141	美深	1978/8/10 21:00	10.000	1979/10/4 7:00	13.000	1980/9/13 16:00	14.000
12181	名寄	1978/8/10 16:00	10.000	1979/7/30 19:00	17.000	----/--/-- --:--	-999.000
12231	下川	1978/8/10 17:00	13.000	1979/7/30 19:00	23.000	1980/7/8 16:00	19.000
12261	士別	----/--/-- --:--	-999.000	1979/7/30 19:00	17.000	1980/6/18 2:00	11.000
12266	朝日	1978/7/12 16:00	26.000	1979/7/30 20:00	17.000	----/--/-- --:--	-999.000
12301	和寒	1978/8/20 1:00	16.000	1979/7/30 19:00	18.000	----/--/-- --:--	-999.000
12386	江丹別	----/--/-- --:--	-999.000	1979/7/30 19:00	16.000	1980/7/11 17:00	24.000
12441	旭川	----/--/-- --:--	-999.000	----/--/-- --:--	-999.000	----/--/-- --:--	-999.000
12451	東川	1978/7/26 3:00	21.000	1979/7/30 20:00	18.000	1980/7/11 19:00	20.000

継続時間分続く

表-4 既往最大降雨強度まとめの例

地点番号	1時間		2時間		3時間		6時間	
	生起年月日時	mm/h	生起年月日時	mm/h	生起年月日時	mm/h	生起年月日時	mm/h
11001	1996/8/18 4:00	45.00	1996/8/18 3:00	31.50	1996/8/18 3:00	25.00	1996/8/18 0:00	14.00
11121	1999/8/27 8:00	35.00	1999/8/27 7:00	30.50	1999/8/27 7:00	23.33	1999/8/27 4:00	12.83
11151	1978/8/14 10:00	32.00	1995/8/12 18:00	29.50	1995/8/12 17:00	22.33	1978/5/31 9:00	13.33
11176	2000/10/9 10:00	44.00	2000/10/9 10:00	36.50	2000/10/9 9:00	26.67	1982/7/12 17:00	14.00
11206	1999/8/22 16:00	44.00	1999/8/22 16:00	27.00	2000/8/11 6:00	21.33	2000/8/11 3:00	14.17
11276	1999/8/22 16:00	42.00	1999/8/22 16:00	26.00	2000/10/8 17:00	21.00	1979/10/19 22:00	14.17
12141	1982/7/12 22:00	32.00	1987/9/9 0:00	19.50	1987/9/9 0:00	15.00	1981/8/5 1:00	11.00
12181	1994/6/13 18:00	50.00	1994/6/13 17:00	30.50	1994/8/14 19:00	23.00	1994/8/14 16:00	15.00
12231	1994/8/14 21:00	25.00	1994/8/14 21:00	20.50	1994/8/14 19:00	20.00	1994/8/14 17:00	14.50

継続時間分

3. 2. 2 確率降雨量算定

年最大降雨の算定で求められた各降雨時間の年最大降雨量のデータセットを用いて確率降雨量を計算した。確率降雨量の計算には、(財)国土技術研究センターより配布されている「水文統計ユーティリティ(Version1.4)」を使用した。対数正規分布4種類と石原高瀬法、岩井法は、母数推定法、形状パラメータ(母数)の数が異なるものの、対数正規分布を基にした分布形である。水文量を対数変換した変量が正規分布に従う場合が多い事が経験的に知られており、また正規分布に関する多くの分布特性を利用する事ができる。ピアソンⅢ型分布はガンマ関数を用いた分布形の1つであり、特に対数変換を行なった対数ピアソンⅢ型分布は、アメリカの Water Resource Council が洪水頻度解析法の基準法として推奨している。グンベル分布(Gumbel)および一般化極値分布(Generalized Extreme Value 分布)は極値理論に基づく分布である。極値理論とは、今回の解析のように一定期間に生じる事象の最大値や最小値などの極値を扱う理論である。特に、一般化極値分布は Jenkinson によって3種類の極値分布が1つの式形に統一された分布であり、1975年に Natural Environment Reserch Council によってイギリス河川の日流量の年最大分布推定に推奨され、イギリスでは水文頻度解析において重要な役割を担っている。平方根指数型最大値分布(SQRT-exponential-type distribution of maximum)は、右側に長く尾を引く形状特性を有しており、より大きな値の正規を可能とする分布形である。

今回の解析では水文統計ユーティリティで計算不能だった標本についてはそのまま計算不能として扱うこととした。水文統計ユーティリティで計算不能の場合とは、母数推定時に対数の引数が負になってしまう標本や、分母が非常に小さく計算式が無限大になってしまい、母数が推定できない場合を指す。

得られた確率降雨量値を確率分布形毎にまとめた。

3. 2. 3 各確率分布に関する適合度及び安定度の調査

確率降雨量の算定で求めた各確率分布形の計算結果をもとに、本アメダス確率降雨の検討(確率降雨強度式の算定)に使用する確率分布形を選定する。確率分布形の選定にあたっては、種々の選定基準が考えられるが、江藤らは、分布関数の適合度、推定値の安定性、推定値の妥当性、理論的背景の有無、簡便

性の観点から総合的に判断すべきとしている。本研究ではこの考え方に従い、本検討に使用する分布形を選定するものとする。

適合度の判定指標としては、SLSC(標準最小二乗規準)を用いた。SLSCは現在、学界で最も有用な適合度の評価指標として支持されているものである。安定度の評価は Jackknife 法により行った。Jackknife 法は、作成する標本数および不偏推定値、推定誤差が一意的に定まる等の長所がある。推定値の妥当性の検討には、既往最大雨量の過大・過小評価比の計算、理論比との比較を行なった。さらに、計算された確率降雨量を用いて確率降雨強度式を算定することから、適用できる標本の数も重要となる。このため、計算可能な標本数の調査も行ない、評価の一材料とすることとした。これに、3.1、3.2で示した各確率分布形の理論的背景、簡便性等を考慮したうえで総合的に評価・判断した。

なお、SLSCや Jackknife の計算には、前述の水文統計ユーティリティを利用した。SLSC 値、相関係数、Jackknife 推定誤差分散は標本毎に、つまり各地点の降雨継続時間毎に得られるため、確率分布形毎に平均を計算し比較を行なった。

1) SLSC 値と相関係数

水文統計ユーティリティの計算結果を用いて各確率分布形の平均 SLSC 値を計算した。プロットイングポジション公式としては、カナン式を用いた。得られた SLSC 値を確率分布形毎にまとめ平均 SLSC 値を算定した(表-5)。

表-5 各確率分布形の平均 SLSC 値

分布形	平均 SLSC 値	平均 Pcor 値 (相関係数)	サンプル数 [*]
LN2LM	0.034	0.989	2805
Iwai	0.035	0.989	4889
LN2PM	0.035	0.989	2805
LogP3	0.035	0.989	6048
Gev	0.036	0.990	6038
LN3PM	0.036	0.990	3754
LN3Q	0.037	0.989	5582
LP3Rs	0.041	0.987	3300
Gumbel	0.047	0.985	6048
Exp	0.053	0.951	6048
SqrtEt	0.055	0.985	6048
IshiTaka	0.113	0.962	3963

(*) サンプル数とは水文統計ユーティリティにおいて母数および確率降雨値が算定可能であった数であり、平均 SLSC 値の算定に利用されたデータ数を示している。

平均 SLSC 値に着目すると LN2LM、IWAI、LN2PM などの対数正規分布が良い適合度を示している。し

かし標本数に着目すると計算可能であった標本が非常に少なくなっている。最も SLSC 値の小さな LN2LM では 2,805 個と全体の半数以下となっている。これは今回、確率降雨量計算および母数推定に利用した水文統計ユーティリティー (Version 1.4) では歪度の絶対値が 0.3 以上となった場合、計算不能としている為と考えられる。このことから、計算可能な標本数の少ない分布形では、母数算定の時点で形状の良くない標本が既に除かれている事となり、単純に SLSC 値の大小だけを見て適合度を判定することは適当でないと考えられる。標本数の少ない分布に比べると、Gev、LogP3 など計算可能であった標本数が多く、平均 SLSC 値が比較的小さい。サンプル数と SLSC 値を見ると LogP3 や Gev などが良好な特性をもっており、LN3Q、Iwai などがこれに続いている。次に各分布形の相関係数値を見ると、どの分布も 0.95 以上となっているが、歪度のチェックの有無を考慮すると、ここでも Gev、LogP3、Iwai、LN3Q などが特に高い相関を示している。

以上の結果から、本解析においては、Gev、LogP3、Iwai、LN3Q などが標本データとの適合度が高い分布形としてあげることができる。

2) Jackknife 計算

各データセットについて Jackknife 推定誤差の標準偏差を計算し、その平均を表-6 にまとめた。

表-6 各分布形の Jackknife 計算結果

分布形	平均 Jackknife 推定誤差偏差	データ個数
LN3PM	109.516	4994
SqrtEt	117.649	6048
Gumbel	121.779	6048
LN2PM	126.882	6048
LN2LM	129.755	6048
Exp	131.969	6048
Gev	137.653	6038
Iwai	142.733	5379
LogP3	144.449	6048
LP3Rs	170.688	3350
LN3Q	176.549	5332
IshiTaka	210.204	5107

ここでデータ個数とは、水文統計ユーティリティーにおいて Jackknife 推定誤差偏差を計算する事が可能であった個数である。Jackknife 計算は、1つの標本から多数の標本を作成するため、作成された標本が計算不可能となる事がありうる。単純に推定誤差偏差の値だけを見ると LN3PM が最も安定してお

り、SqrtEt、Gumbel がそれに続くという結果となった。しかしながら、1)において計算可能データセット数が多く適合度の高かった Gev、LogP3、Iwai、LN3Qなどに着目すると、Gevが最も安定度が高い。

3) 既往最大雨量の過小・過大評価比の算出

既往最大雨量の過小・過大評価比の算出は、SLSC 値、Jackknife 計算において適合度および安定度に優れていた Gev、LogP3、LN3Q、Iwai の 4つを対象とする事とした。計算した比率を表-7 に示す。

表-7 過大・過小評価結果

分布形	過大	過小
理論比	0.370	0.630
GEV	0.549	0.451
LogP3	0.530	0.470
IWAI	0.509	0.491
LN3Q	0.471	0.529

どの確率分布形も理論比に近い結果とはならなかった。今回の標本は選別したアメダスデータを用いているため、各標本のデータ数は 20~25 個となっている。カナン公式による超過確率から既往最大雨量 (各標本の最大の値) の確率再現年を計算すると最小 33.7 年、最大で 42 年である。この事から、今回得られた結果は、各確率分布形で 33.7 年から 42 年程度の確率雨量を求めた時の過大・過小評価比と見る事が出来る。GEV、LogP3、IWAIなどは、この程度の確率再現年の確率雨量については実績雨量よりも大きな値を出す傾向があり、LN3Q ではその反対の傾向があるとも言える。

今回、理論比に近い分布形が得られなかった理由としては、アメダスデータの場合、既往最大雨量を算定するための資料の期間(数)が、既往最大雨量の過小・過大評価比を算出するためには十分長い(多い)とは言えない事も 1つの要因として考えられる。

4) 総合評価

以上の結果から、適用可能なサンプル数、平均 SLSC 値、平均相関係数、Jackknife 計算による安定度を考慮し、GEV を今回の調査目的に用いることとした。確率降雨解析は毎年最大値という極値を扱う解析であり、今回のように、標本数に比べて長い確率再現年を対象とする解析においては、単純に適合度のみの判定ではなく、統計極値理論に基づく極値分布により統計解析を行なう事は妥当と考えられる。

3. 2. 4 確率降雨強度式の算定

今回、処理対象となったアメダス観測地点につい

て、簡単に降雨の確率解析を行なう事ができる確率降雨強度式を、GEV 分布による値を確率雨量として利用し算定する。

GEV 分布によって、全 6,048 標本中、6,038 の標本の確率降雨量が得られている。フェア式算定にあたり、全ての降雨継続時間について確率雨量が求められている地点についてのみ確率降雨強度式を算定するものとした。これにより解析対象 756 地点中 748 地点が選択された。確率降雨強度式としてはフェア式を採用した。これまでの土木研究所の解析によれば、フェア式を用いた確率降雨量は、元の確率降雨量と非常に高い相関を持っている。

3. 2. 5 ホームページでの公開

今回の解析の結果得られたフェア式パラメータを収録した”アメダス確率降雨量計算プログラム”を土木研究所ホームページ上で公開した。また、アメダス確率降雨解析プログラムの概要と利用に関する手引きを作成し、同時に公開した。

3. 3 水文統計ライブラリの構築

3. 3. 1 ライブラリの設計

作成するライブラリに実装する各確率分布形の母数推定、確率量計算手法について、最も適切な方法を水文・水資源ハンドブック¹⁾等の文献を利用し調査した。設計にあたっては、気象研究所における数値モデル構築の標準コーディングルール等を参考としてコーディングルールを決定し、そのルールに従うものとした。また、互換性維持のため一部の開発環境に依存する言語拡張機能は利用しないものとした。さらに、ライブラリ構築にガンマ関数など特殊関数の計算が必要になった場合、出来るだけこれらの既存の数学ライブラリを用いて実装を行なうようにした。また、ソースコードを公開する事を考慮し、コードを判読しやすくするため、プログラムソースには適宜コメントを挿入する設計とした。

3. 3. 2 ライブラリの構築

対象となる確率分布形それぞれについて、以下の 4 つの機能を持つサブルーチンまたは関数副プログラムを作成した。

- (1) 標本から確率分布形の母数を推定する。
- (2) 母数と確率再現期間から確率量を算定する。
- (3) 母数と確率量から確率再現期間を算定する。
- (4) (1)～(3)の結果をもとに適合度指標を算定する。

上記 4 つの機能分類は、Mathematica 水文統計プログラムを参考としたものである。また、ライブラリと組み合わせて用いる標本データ処理ユーティリ

ティープログラム(ソート、平均・標準偏差などの計算、最大値・最小値などの調査)も同時に構築した。さらに、ライブラリ使用に関するドキュメント及び、利用に関するドキュメントを作成した。利用に関するドキュメントには、ライブラリに含まれる関数及びサブルーチンの使用方法をサンプルプログラム例と共に記述した。

3. 4 メソスケール大気モデルによる豪雨の再現

3. 4. 1 大気モデルの開発と概要

豪雨を定量的にシミュレートできるメソスケール大気モデルを開発し、既往の主要降雨対象とした再現計算を試みた。

今回開発したメソスケール大気モデルは、地球温暖化の影響予測の目的で旧土木研究所とカリフォルニア大学デーヴィス校の共同研究で開発したメソスケール大気水文統合モデル(Integrated Regional Scale Hydrology / Atmospheric Model: IRSHAM)から短期的な気象現象にはほとんど影響しないと考えられる地表面水文過程を取り除いて簡略化した、水平 20×20km、鉛直 10 層(σ座標系)のプリミティブモデルである。

このように開発したメソスケール大気モデルを用いて、1998 年 8 月 26 日から 31 日にかけて北日本・東日本を中心に発生した集中豪雨(気象庁命名:平成 10 年 8 月末豪雨、栃木県那須町において総降水量 1,254mm を記録)を対象とした再現計算を実施した。本計算の初期値は、気象庁の現業領域数値予報モデル(Regional Spectral Model: RSM)の初期場として作成されている領域客観解析値(Grid Point Value: GPV)を使用した。また、図-3 に示す本州域を水平格子間隔 20×20km で 64×64 メッシュに分割して計算対象領域とした。なお GPV の作成には、0900JST と 2100JST の 1 日 2 回、12 時間毎であるため、本計算においても 0900JST と 2100JST の 12 時間毎に初期化を行った。

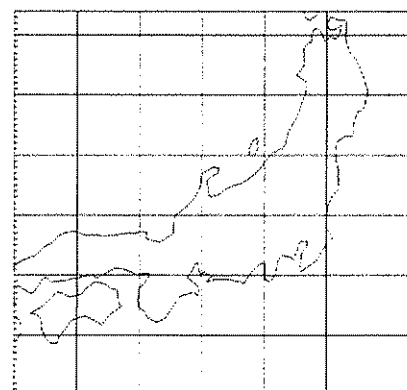


図-3 計算対象領域

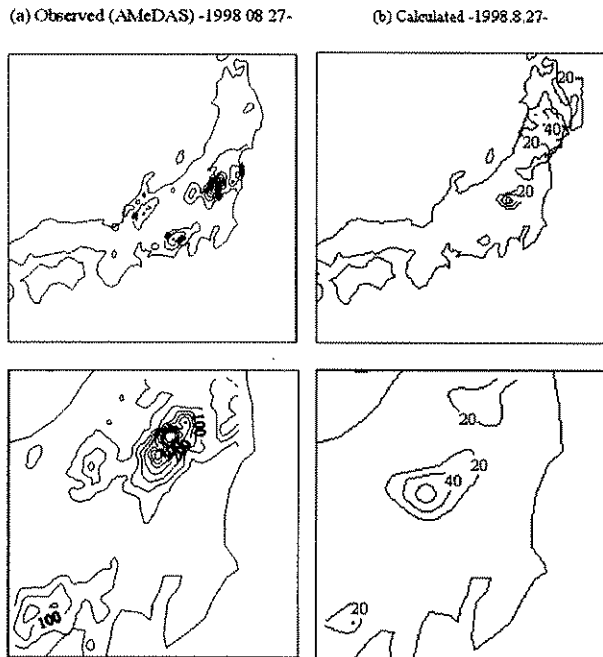


図4 日降水量分布 (1998.8.27)

単位：mm/day

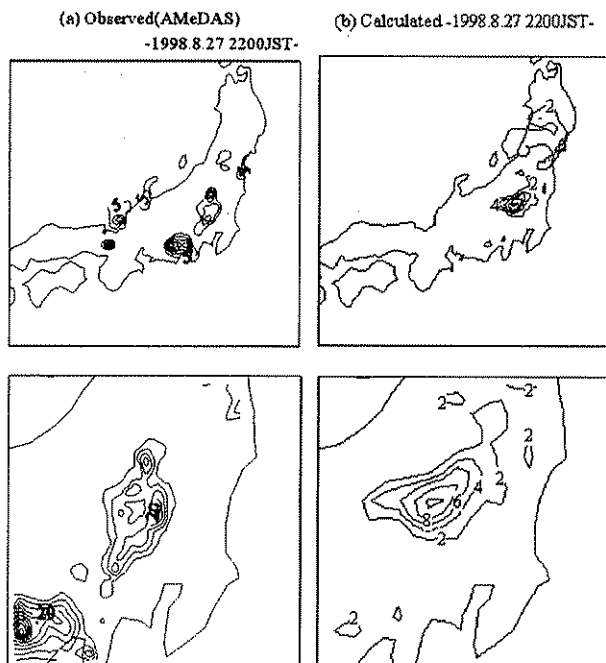


図5 時間降水量分布 (1998.8.27 2200JST)

単位：mm/hr

3. 4. 2 再現計算結果

(1) 日降水量

8月27日における日降水量分布を図-4に示す。(b)大気モデルによる計算値は、(a)AMeDASによる実測に比べて小さく見積もられているものの、降水域については、かなり正確に再現できており、特に記

録的な豪雨を観測した栃木県那須地方の降水域については、南西方向に80km程度(南方、西方にそれぞれ3メッシュ程度)のずれにとどまっている。

(2) 時間降水量

8月27日2200JSTにおける時間降水量分布を図-5に示す。日降水量と同様、大気モデルにより計算された時間降水量は、(a)AMeDASによる実測と比較して小さく見積もられているものの、降水域については比較的よく再現できている。

3. 5 地球温暖化再計算

3. 5. 1 本州・四国域への影響計算の概要

地球温暖化の影響予測再計算は、北緯22~58度、東経110~160度の範囲を60kmメッシュから成る範囲にIRSHAMを適用し(大領域モデル)、本州・四国域を含む範囲を20kmメッシュでモデル化し(小領域モデル)、小領域モデルを大領域モデルにネスティングしたモデルにより土木研究所とカリフォルニア大学デービス校は流域スケールの気候変動を知るために開発された大気水文統合モデル(IRSHAM)を用いてシミュレーションを行った。大領域モデルの初期条件並びに境界条は気象研究所のGCM(MRI-GCM)による現状(1×CO₂)及び二酸化炭素倍増条件下(2×CO₂)での3年間分の計算結果をもとに与えられた。さらに、大領域モデルによって得られた計算結果は小領域モデルの初期条件並びに境界条件として与えられた。IRSHAM開発途上には、計算不能あるいはシミュレーション精度が極端に低い問題に直面したが、既往の研究成果として大気モデル最下層と表層部の地表面過程を連結させた解法⁷⁾を加えたこと、地表面過程の面的な非均一性を考慮するモデルを加えたことにより、これらの問題を解決することができた。

3. 5. 2 地域毎の温暖化予測計算結果

現状及び二酸化炭素濃度倍増時の計算降水量を整理する際、20kmスケールの個々の計算メッシュで整理することもできるが、時として妥当性を欠く変動が計算結果に含まれる可能性があるため、地域的に平均して整理する。これは大気水文モデル計算において、先述の種々の制約・限界に起因する計算値の不確実性であると考えられる。本来、20kmの分解能を持つ当小領域モデルは、年降水量で見たように、この分解能で表現される地形の影響を受ける気象を再現するものであり、各メッシュの計算値のみから直接利水計算を行うことは不十分であると判断するからである。IRSHAMによる二

酸化炭素濃度倍増計算結果によると、本州・四国域では全体として降水量が724mmから555mmへと減少する。これを地域的に見ると、日本アルプス付近で3,000mm程度の年降水量が2,200mm程度まで減少し、同様に、関東、仙台付近、及び山陰から北陸の一部にかけては800mm程度から400mm程度に減少する。本研究では地域毎の計算降水量を検討するための一例として、これらを図-6のクリーガー曲線で用いる地域区分を用いた。このとき、月毎のその変化を整理すると図-7のとおり、ほぼ全ての地域、全ての月で降水量は減少となる。特に、3-6月の降水減少は他の月に比べて大きくなっている。これは、MRI-GCMのシナリオ下において地域的な水管理に与える影響シナリオとして、地域によらない一般的シナリオと成り得ると考えられる。

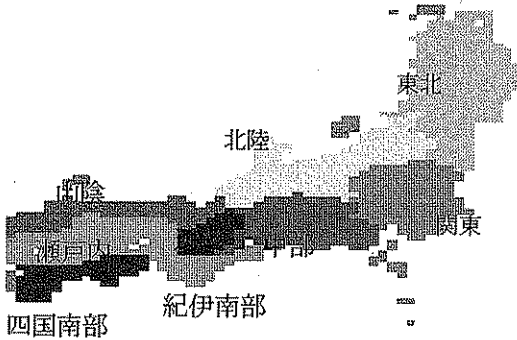


図-6 地域区分

3. 5. 3 降水量の変動幅の変化

流域での水利用への影響を知るためには、降水量の期待値変化だけでなく、変動幅に関する情報も必要である。特に重要なのは、水不足が発生する少雨の発生頻度の変化である。当該流域の降水量の平均値と標準偏差の変化

を知ることが出来れば、気候変動がない場合とある場合の2種類の人工的に合成¹⁰⁾した流量あるいは降雨を作成し、それぞれの合成流量で利水計算をして、水利用に障害が発生する頻度の違いを調べることで、二酸化炭素倍増時の水不足発生頻度の変化を推定することが可能となる²⁾。

このような利水計算に反映するため、各月の日降水量の標準偏差を、計算メッシュ毎に計算した。月単位で整理したのは、一月内に日平均雨量値の期待値はほぼ一様と見なすことができ、標準偏差を計算

するに十分な数のサンプルが得られるからである。

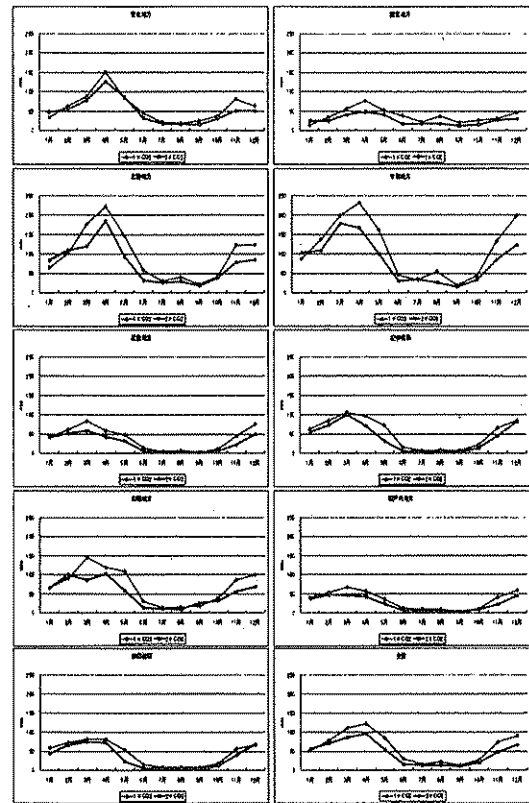


図-7 二酸化炭素倍増による月別に表した地域区分別の日平均降水量(mm/day)

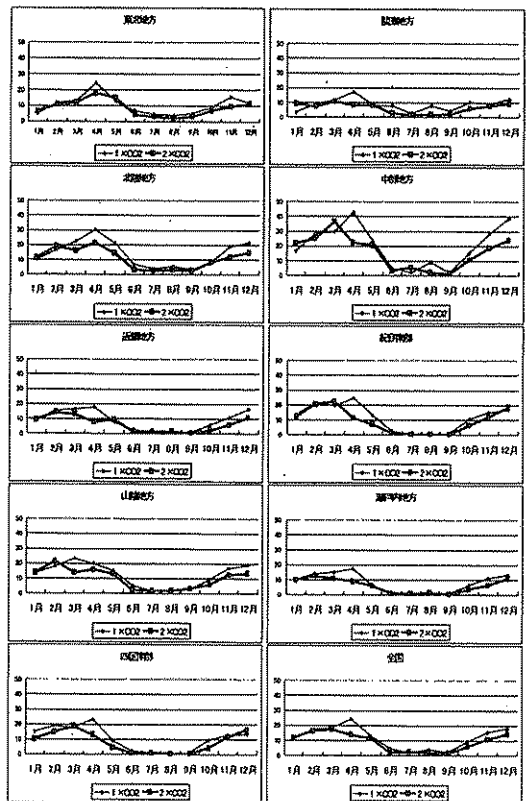
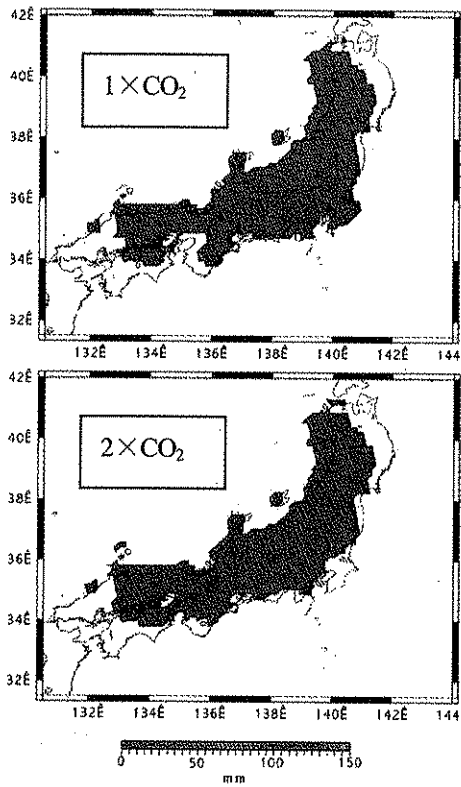
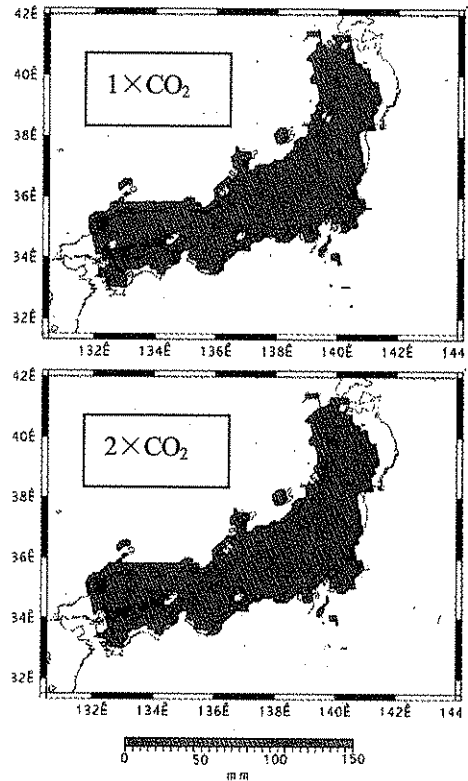


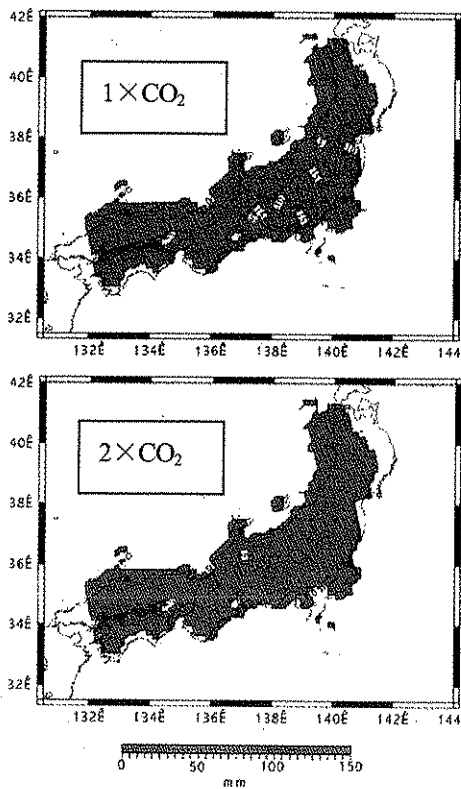
図-8 二酸化炭素倍増による月別に表した地域区分別の日平均降水量標準偏差



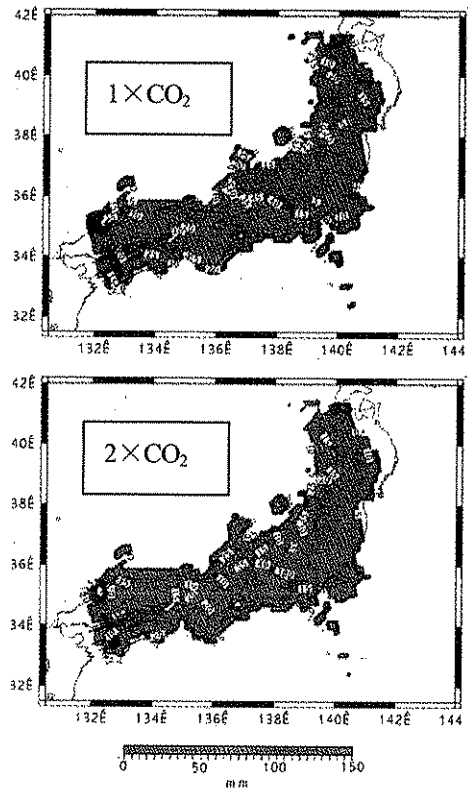
8月の日降水量の平均値(mm)



2月の日降水量の平均値(mm)



8月の日降水量の標準偏差(mm)



2月の日降水量の標準偏差(mm)

図-9 本州・四国域の2日平均雨量計算値の平均値と標準偏差

日平均降水量と同様に、地域区分毎に標準偏差を平均すると図-8 のようになる。全般的に、降水量の標準偏差は二酸化炭素倍増により減少する。特に、地域によらず4月と11、12月でその傾向が顕著である。標準偏差の減少が顕著な地域は、中部地方であり、山岳部での変化が顕著なためと考えられる。

3. 5. 4 降水量の平均値、標準偏差の地域分布

各水系ごとの降水量と標準偏差の変化を知ることができるように、本州・四国域で計算された降水量の平均値、標準偏差の地域分布をみる。夏冬の代表として2月と8月の結果を図-6に示した。図-4に示したとおり、二酸化炭素倍増により降水量は2月、8月とも全域で減少する傾向にある。他の月の傾向は次のようである。1月と3月は炭酸ガス倍増シナリオで増加する地域と減少する地域があり、山岳部文は1月に増加、3月に減少している。6-7月は8月と同様に全域で降水量が減少し、9-10月では、関東以外で降水量が減少する。11月は若干の降水量の減少が見られ、12月は降水量が若干増加する。

2月の日平均降水量と標準偏差の分布を比較すると降水量が多い東北日本海側や中部山岳部において、標準偏差も大きくなっているのに対し、紀伊半島付近や四国南部は降水量が小さいにもかかわらず標準偏差は他地域より大きくなっている。二酸化炭素濃度倍増による標準偏差の縮小の地域差はないように見える。

8月は、降水量はどの地域でも少なく、中部、関東の山岳部の標準偏差が大きくなっているが、二酸化炭素倍増によりその変動幅は縮小している。

上記の地球温暖化の降水特性に与える影響評価は、3年間のシミュレーション結果に基づくものであり、ここで得られた標準偏差を渇水時の局値現象に適用することは大きな誤差を伴うことが考えられる。しかし、この種の情報は他には見られないので、流域水利用への影響を検討する際の参考情報として活用することができる。

3. 6 タンクモデルのパラメータ設定に関する検討

最初に、1971年8月30日の洪水を対象に、3段タンクモデルで洪水の再現計算を行い、ハイドログラフの見た目であわせたパラメータの組み合わせが複数存在するかを確かめた。結果を表-8に、計算されたハイドログラフを図-3に示す。

特にパラメータ b_1 の値が大きく異なるパラメータの設定で、どれもハイドログラフを良く再現できしており、タンクモデルのパラメータ設定には複数解

表-8 3段タンクモデル設定パラメータ

		CASE4	CASE5	CASE6
一段目	S1=	0	0	15
	h1=	60	65	65
	a1=	0.5	0.1	0.1
	h2=	20	50	20
	a2=	0.02	0.01	0.02
	b1=	0.09	0.05	0.01
	h3=	5	40	10
	a3=	0.02	0.02	0.01
二段目	S2=	0	0	5
	h1=	10	15	75
	a1=	0.1	0.2	0.1
	b2=	0.03	0.01	0.02
三段目	S3=	10	5	5
	h1=	15	15	75
	a1=	0.4	0.2	0.1
	b3=	0.03	0.01	0.02

が存在することがわかる。この結果は、タンクモデルのパラメータ設定の任意性の高さを証明するものである。裏を返せば、誤ったパラメータの設定方法をとると、誤った答えを導いてしまうことを示すものである。

次に、上記でひとつの洪水(1971年8月30日)だけで設定したパラメータ(CASE4, 5, 6)を、そのまま別の洪水に対して当てはめ、結果を見た。1986年5月14日と1990年9月30日の洪水に対して当てはめた結果を図-4に示す。この図より、どちらの洪水に対してもどのCASEも全く合わず、タンクモデルのパラメータ設定は、同流域であってもひとつの洪水に対してでは不十分であることがわかる。これも同様にタンクモデルのパラメータ設定の任意性の高さを表すものである。

今回行ったタンクモデルのパラメータの設定は、流量実測値との適合性を見た目だけで合わせて行ったものであり、降雨・流出の物理過程は考慮していない。このように、タンクモデルのパラメータの設定方法は自由度が高く、その物理性を説明することは難しいのが実情である。以上のことから、タンクモデルの創作者である菅原が示しているとおおり、少なくとも10降雨以上の降雨でパラメータを合わせないと、有効な計算はできない。また流域毎の特性を考慮しなければ、有効なパラメータを設定することはできない。

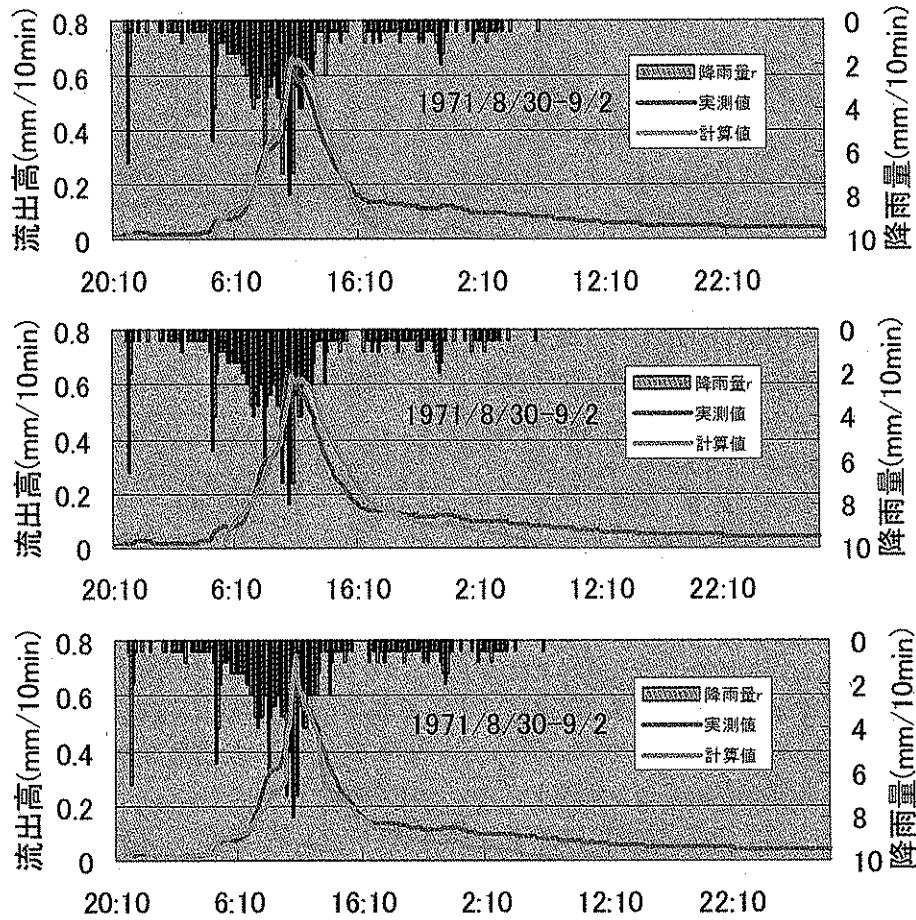


図-3 ひとつの洪水に対して異なるパラメータを当てはめた結果(上から CASE4,5,6(表-8))

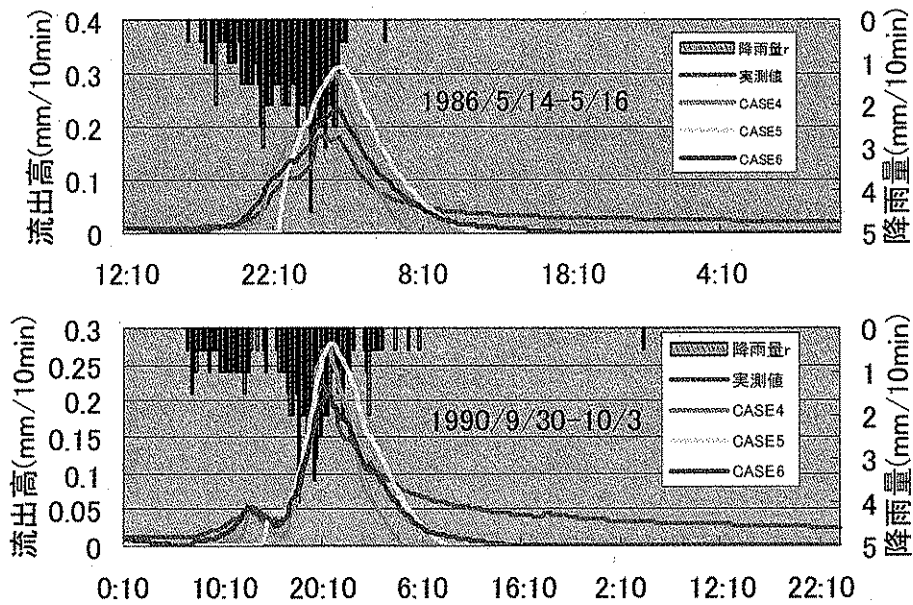


図-4 ひとつの洪水で設定したパラメータ(CASE4,5,6(表-8))を他の洪水に当てはめた結果

3. 7 模型製作

今回作成した模型の状況を写真1、2に示す。写真1の左側が給水装置で、一旦貯められた水道水が降雨装置(写真2上部)を経て浸透層(写真2下部)に滴下する。浸透層にはスポンジを用いた。スポンジを入れた容器全体の大きさは長さ2m、幅50cm、高さ50cmである。容器の下端部では浸透層からの流出が自然流下する。その量は転倒マス雨量計によって測定され、パソコンに取り込むことができる。本装置により時間雨量400mm程度までの降雨流出現象が再現できることを確認した。



写真1 模型の全体

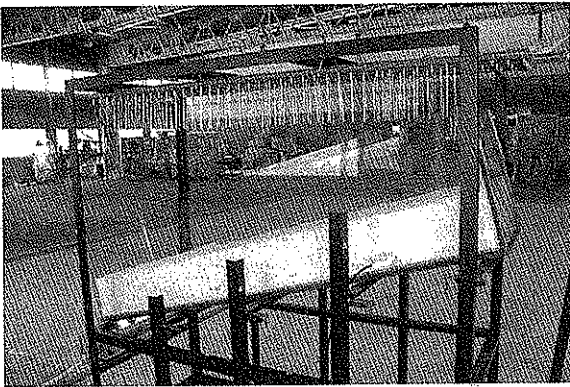


写真2 散水装置と浸透層の様子

4. まとめ

4. 1 降雨特性の長期変動に関する既往研究調査

過去のデータに基づいた既往の研究結果を整理した結果、以下のことがわかった。

- (1) 時間データを用いた解析は、1970年代からの約30年の期間に対したものであり、それ以前の期間に対しては日降水量での解析が主である。
- (2) 日本の年降水量は減少傾向にある。
- (3) 年々変動幅は増大傾向にある。
- (4) 大雨頻度、大雨強度は増加傾向にある。

(5) 北日本海側および近畿、九州から中国地方の日本海側では、大雨頻度・強度ともに減少傾向にある。

4. 2 アメダス観測点における確率降雨の算定

現在入手可能な全てのアメダスデータ(1976年から2000年まで)と、これまでに提案され利用されてきた確率分布形(12種類)を用いて、全国アメダス観測地点における確率降雨に関する検討を実施した結果、以下の成果が得られた。

(1) 全国の全てのアメダス降雨データに品質チェックをかけ、確率統計解析に有効な同質で20年以上の年最大降雨量値を算定可能な地点(756地点)及び降雨データを抽出した。

(2) 上記756地点における8種類の降雨継続時間(1,2,3,6,12,24,48,72時間)に対する毎年最大降雨量および、既往最大降雨量を算出し、表形式にまとめた。

(3) 確率降雨解析に用いる最適な確率分布形の選定手法に関する調査を行い、最適な確率分布形は、分布関数の適合度、推定値の安定性、推定値の妥当性、理論的背景の有無、簡便性の観点から総合的に判断して選定すべきとの結論を得た。

(4) (1)(2)で集計した降雨データに、(3)で調査した各選定基準に当てはめた結果、全国のアメダス観測地点における降雨データ標本に適合度が良好な確率分布形は、Gev、LogP3、Iwai、LN3Qであることがわかった。また、安定性に関してはLN3PM、SqrtETなどが良好な結果を示すことがわかった。

(5) 適合度、安定性の良好な4つの確率分布形(Gev、LogP3、LN3Q、Iwai)について、既往最大雨量の過大・過小評価の調査を行なった結果、理論比に近い評価比を持つ確率分布形は得られなかった。これは、今回使用したアメダス観測データの期間(数)が既往最大雨量の過小・過大評価比を算出するには不十分であったことが考えられる。

(6) 上記の他に、計算可能サンプル数や推定値の妥当性、理論的背景の有無などを加味して、全国アメダス観測地点における降雨観測データの確率降雨解析にはGEVを使用することにした。

(7) GEV分布により計算した確率雨量を用いて、確率降雨強度式を算定(フェア式パラメータを算定)し、元の確率雨量値と高い相関を持つことを確認した。

(8) (7)までに得られた結果を用いて、全国アメダス観測地点の確率降雨を簡単に計算できる「アメダス確率降雨量計算プログラム」(Excelマクロプログラム)を作成し、誰でも使えるように土木研究所ホームページ上に公開した。

4.3 水文統計ライブラリの構築

様々な確率分布形の母数推定、確率量算定を行なう機能を有し、ソースコードの公開を前提とした水文資料の統計処理に有用な計算ライブラリを設計・構築し、利用のためのドキュメントも整備した。

主な機能は下記の4つである。

- (1) 標本から確率分布形の母数を推定する。
- (2) 母数と確率再現期間から確率量を算定する。
- (3) 母数と確率量から確率再現期間を算定する。
- (4) (1)～(3)の結果をもとに適合度指標を算定する。

4.4 メソスケール大気モデルによる豪雨の再現

豪雨を定量的にシミュレートできるメソスケール大気モデルを開発し、既往の主要降雨を対象とした再現計算を試みた。その結果、対象降雨時の気象状況を概ね再現することができ、特に降水域の再現性については精度良く計算できた。しかしながら、定量的な降雨予測に用いるだけの精度はまだ達成されていない。

4.5 地球温暖化再計算

MRI-GCM の現況及び二酸化炭素濃度倍増計算結果3年分を用いて、20km メッシュの分解能を持つIRSHAMにより本州・四国域の降水量分布を計算した結果から以下の結論及び推論が導かれた。

- ・MRI-GCM アウトプットのダウンスケール結果は、降水の地域分布は比較的良好であるが、降水量は過小に計算される。
- ・二酸化炭素倍増により降水量の平均値は、ほぼすべての地域で減少する傾向がみられ、3～6月でその傾向が顕著である。
- ・二酸化炭素倍増により降水量の標準偏差は、ほぼすべての地域で減少する傾向が見られ、4月及び11～12月にその傾向が顕著である。

本研究で得られたメッシュ毎及び地域区分における、月単位での計算降水量平均値と標準偏差を整理し、今後の流域水利用への温暖化影響研究に生かすことができるよう数値データをホームページに公開した。
(http://www.pwri.go.jp/team/suiri/analyzed_data.htm)

4.6 タンクモデルのパラメータ設定に関する検討

- (1) タンクモデルのパラメータ設定には複数解が存在することを示し、タンクモデルのパラメータ設定の任意性の高さを証明した
- (2) タンクモデルのパラメータ設定は、同流域であってもひとつの洪水に対してでは不十分であることを示した。

4.7 模型製作

本検討においては、一般市民を対象として山腹斜面の降雨流出現象の理解を深めてもらうため、降雨流出現象を模擬できる模型を製作し、降雨と流出の関係について把握を試みた。

参考文献

- 1) 水文・水資源学会編：水文・水資源ハンドブック、朝倉書店、pp.228～255、1997.10.
- 2) 水理公式集
- 3) 河川砂防技術基準(案)
- 4) 気象庁観測部長：地域気象観測統計の接続可否並びに観測所番号の取り扱いについて(通知)、平成10年3月30日
- 5) 建設省河川局：水文観測業務規程、平成12年3月