

全国における確率降雨強度式の現状と 作成方法に関する一考察

STORM INTENSITY-DURATION -FREQUENCY EQUATIONS: THE PRESENT STATUS AND METHODOLOGIES IN JAPAN

荒川 英誠¹ ・ 宝 馨²

Hiddenobu ARAKAWA and Kaoru TAKARA

¹正会員 工修 京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学防災研究所教授 水災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

This paper first reports the current situation of the IDF (Intensity-Duration -Frequency) equations used in all the local prefectural governments in Japan, based on the authors' questionnaire responded from all the forty-seven prefectures in summer 2004. The responses to the questionnaire showed that the traditional methods for IDF equations are still widely used, regardless of the recent remarkable developments of data processing including computer technologies, frequency analysis methods and accumulation of systematic meteorological and hydrological data. Based on the results of the questionnaire and rainfall data provided by a number of prefectures, this paper also discusses how to select probability distribution functions and IDF equations from their candidate ones.

Key Words : IDF, DD, probability distribution, frequency analysis, goodness of fit

1. はじめに

全国の中小河川や下水道, 道路等の排水計画は, 合理式により流出量を求めることが多い。降雨強度はその合理式への入力であり, 計画規模に応じた降雨強度を与える確率降雨強度式(以下, 単に降雨強度式と呼ぶ)は水工計画上, 重要な役割を持っている。しかし, その降雨強度式は都道府県毎に作成されているため, 個々の組織によりその作成手法, 整備状況はまちまちで, これまでその作成手法や適用実態についてとりまとめられたものは無かったように思われる。一方で, 近年水文統計解析分野では, 様々な確率分布形や適合度評価指標の提案がなされ, 降雨強度式について活発な議論¹⁾²⁾のあった1970~80年代以前に比べ技術的進歩も著しいものがある。

本論文は, 全国47都道府県への降雨強度式の作成時期, 作成条件等の現況に関して実施したアンケートの結果について報告するとともに, それに伴い入手した全国各地の継続時間別年最大降雨データをもとに, 近年の統計解析手法を踏まえた降雨強度式の作成方法に対して考察を加えたものである。

2. 確率降雨強度式の式形

降雨強度式の式形には, 過去に式(1)~(8)に示すよう

な様々な提案がなされているが, 現在我が国では, この内の(4)式(君島型またはCleveland型と呼ばれる)が最も広く用いられているようである。「君島」とは, 明治~昭和初期に活躍された九州帝国大学の君島八郎教授のことと思われるが, この式形を教授が開発したかについては確認できていない。ただ昭和10年頃には著書³⁾の中で式(1)の形式の降雨強度式について紹介しており, 降雨強度式をほぼ最初に我が国に紹介した人物と言えそうである。この他海外では, 地点での降雨強度に対し面積平均の降雨強度が低下する現象を, 面積減少係数(areal reduction factors)を用いて表現し, 流域降雨強度として算定する試みも見られる⁴⁾。

(1)~(8)の各降雨強度式について, 後述するアンケート結果を踏まえて簡単に紹介する。式(1)~(3)は, 各々Talbot型, Sherman型, 久野・石黒型と呼ばれる2定数の降雨強度式であり, (4)式が我が国で多用される以前によく採用された形式であるが, 現在でも用いられている地域もある。式(4)~(6)は3定数型であり, 2定数の(1)~(3)に比べて確率雨量に対して柔軟に対応できることから必然的に適合度の良い降雨強度式を作成できるが, (5), (6)の形式は我が国ではほとんど用いられていない。(7), (8)式は確率年を含む形式であるが, 確率規模ごとの降雨強度曲線の勾配が一定という特殊ケースとなるため,

我が国では採用されていないようである。

$$I = \frac{a}{t+b} \quad \cdots (1) \quad I = \frac{a}{t^n} \quad \cdots (2)$$

$$I = \frac{a}{\sqrt{t}+b} \quad \cdots (3) \quad I = \frac{a}{t^n+b} \quad \cdots (4)$$

$$I = \frac{a}{(t+b)^n} \quad \cdots (5) \quad I = \frac{a}{(\sqrt{t}+b)^n} \quad \cdots (6)$$

$$I = \frac{C \cdot T^m}{(t+d)^n} \quad \cdots (7) \quad I = \frac{K \cdot T^x}{t^n} \quad \cdots (8)$$

t : 降雨継続時間, T : 確率年

a, b, n, m, C, K : 地域定数

3. 全国の確率降雨強度式作成状況

降雨強度式の作成手順は、建設省（現国土交通省）河川局編集の資料⁵⁾によれば、①資料収集により10, 20, 30, 60分, 2, 3, 6, 12, 24時間雨量の各年最大値を抽出し、②異常値の棄却検討の後、確率計算（岩井法、Gumbel法等3種類以上の手法の比較）により各継続時間の確率雨量を算出し、③各確率別の降雨強度をもとに、最小二乗法により降雨強度式を作成する、降雨強度式の形は適合度や近傍流域への適用の有無等から適宜選定する、とされている。しかし、実態として降雨強度式がどのように作成、活用されているかこれまでにとりまとめられたものは見受けられない。このため本研究では、まず全国47都道府県に対して降雨強度式に関するアンケートを実施した。アンケートの回収率は100%であり、各自治体において降雨強度式への関心が高いことが伺われた。以下に、アンケートの設問ととりまとめた結果について示す。（結果の数値はその項目に回答した自治体数を表す）

(1) アンケート結果

Q1. 貴部署では降雨強度式を作成されていますか？

はい：47 いいえ：0

Q2. 貴部署以外に降雨強度式を作成している部署はありますか？

はい：11 いいえ：26 不明：10

Q3. 貴部署で作成の降雨強度式はどの分野で使用されていますか？ 該当する分野a～eに○印をお付け下さい。（複数回答可）

a. 河川計画：47 b. 砂防：29 c. 下水道：19
d. 道路排水計画：8 e. その他：8

Q4. 改修計画のある河川のうち合理式により計画流量を算定している河川の割合は？ 該当する割合a～dに

○印をお付け下さい。

a. 概ね30%未満：10 b. 概ね30～50%：18
c. 概ね50～80%：16 d. 概ね80%以上：16
未記入：1

Q5. 現行の降雨強度式の策定年はいつですか？

a. 2001年以降：14 b. 1991～2000年：21
c. 1981～1990年：4 d. 1971～1980年：6
e. 1970年以前：1 未記入：1

Q6. 降雨強度式は定期的に更新していますか？

はいの場合、何年程度のスパンで更新されますか？

はい：15 いいえ：31 未記入：1

“はい”の内、

10年間隔：11 5年間隔：3 毎年：1

Q7. 降雨強度式作成にあたって貴県内をいくつの区域に区分していますか？

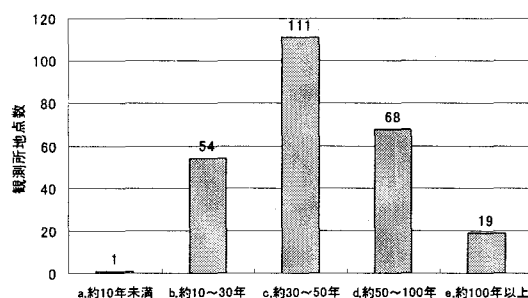
a. 1箇所：6 b. 2～4箇所：16
c. 5～10箇所：17 d. 11箇所以上：8

Q8. 対象とする雨量は観測所の地点雨量ですか、区域の平均雨量ですか？

地点雨量：46 区域平均雨量：1

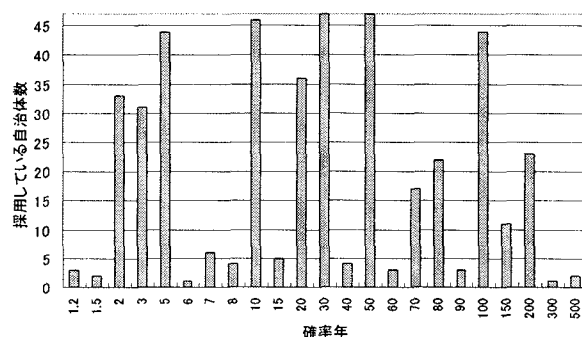
Q9. 確率雨量算定のための降雨資料期間はおおよそ何年間ですか？ 該当する年数a～eに○印をお付け下さい。また、その年数に該当する区域数を（ ）内に併せて回答下さい。

（各資料年数で確率雨量を算定している観測所の数）

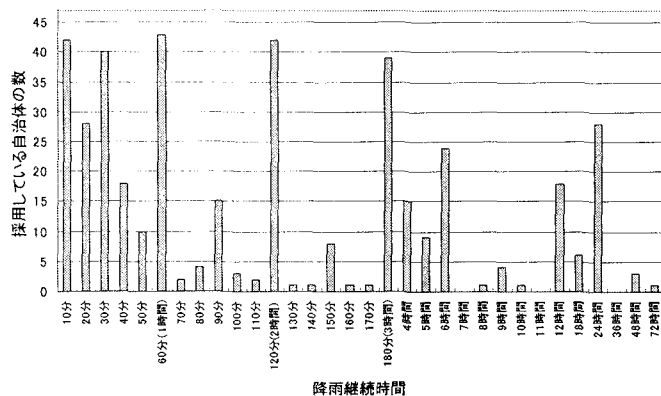


Q10. 作成している確率規模は何年ですか？

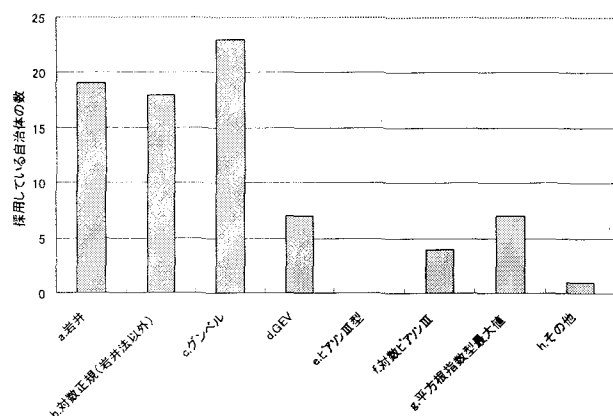
（回答例：5, 10, 30, 50, 70, 100年）



Q11. 確率雨量を算定した降雨継続時間はどのようなか？(回答例1:10分, 30分, 1時間, 2時間, 3時間, 12時間, 24時間, 回答例2:10分, 60分(特性係数法))



Q12. 確率雨量を決定した確率分布形は何ですか？ 該当する分布形 a~h に○印をお付け下さい。(複数回答可)



Q13. 降雨強度式は長時間, 短時間に分割されていますか？

分割している : 14, 分割していない : 33

Q14. 降雨強度式の式形は以下のどのタイプですか？ 該当するタイプに○印をお付け下さい。(先述の式(1)~(8)から選択する)

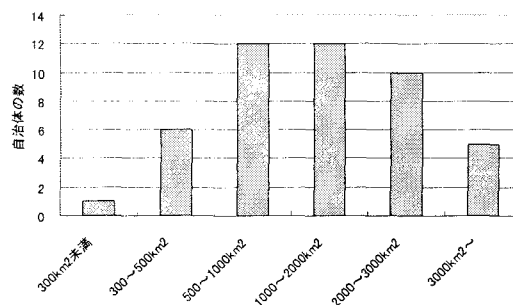
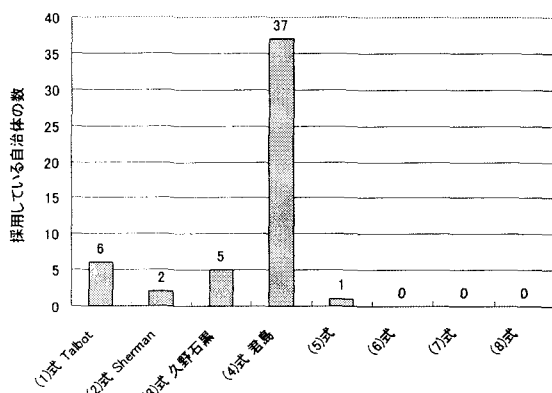


図-1 降雨強度式作成1区域当たりの面積

アンケートの設問ごとに, 降雨強度式の現状として把握されたことを列記すると以下のようなものである。

Q4: 降雨強度式を用いる合理式によって, 計画流量を算出している河川が50%以上という自治体は34/47である。

Q5: 2001年以降に降雨強度式を再作成している自治体は全体の3割(14/47)に達する。河川法改正に伴う河川整備計画の策定に関連し, 見直しを図っている自治体も多いと推測される。また定期的に降雨強度式を更新している自治体は全体の3割程度(15/47)であった。

Q7: 降雨強度式評価地点が県内に4カ所以下という自治体は47% (22/47)であった。図-1に各都道府県の面積を回答区域数で除した面積を示す。概ね500~2000km²に1箇所割合で降雨強度式が作成されていることが分かる。地域の降雨特性に応じた regionalization (地域総合化) によって地域分割を行う必要があるが, この種の研究はまだ必ずしも我が国では進んでいるとは言えない。

Q9: 確率計算の資料期間は30年以上を目途としている自治体が多い。一般にある程度適合度の良い確率分布形を得るためには概ね30年以上の資料が必要と言われていたことから, 妥当な結果といえる。

Q10, Q11: 降雨強度式の対象確率規模, 確率雨量を評価する降雨継続時間帯については, 多くの自治体で採用されている値はあるものの自治体ごとに様々である。これは各自治体での洪水計画への方針の差異, 地域ごとの降雨資料整備状況の差異が原因と思われる。

Q12: 確率雨量を決定している確率分布形は, 対数正規分布, グンベル分布が多い。過去, 確率雨量の評価がこの2つの分布形を中心に検討されていることから順当な結果である。今後, GEV分布他の比率も高くなるであろう。

Q13: 降雨強度式を降雨継続時間に応じて変化させている自治体は全体の約3割(14/47)であった。

Q14: 降雨強度式の式形は(4)式(君島型)とする自治体が圧倒的である。(4)式は3定数型で2定数型の(1)~(3)式を統合したタイプであることから, 順当な結果である。

その他, 自由記入形式で質問した降雨強度式に関わる問題点については, 以下のような課題が挙げられていた。

- ・近年の降雨状況が反映されていない。(3件)
- ・降雨強度式を見直す場合の既往計画との整合。(4件)
- ・降雨強度式作成箇所数が少ない。(3件)
- ・確率計算結果の適合度判定。(1件)

降雨強度式の作成箇所数が少ない原因は、資料期間が十分な観測所が限られているためとする自治体が複数見られ、資料の蓄積がまだ十分でないことが分かる。また、降雨強度式の見直しにより、既往計画を大幅に変更せざるを得ないという不都合が発生する可能性があることも行政上の課題となっている。

4. 確率降雨強度式の作成の実際

ここでは実際に実績雨量データから降雨強度式を作成し、作成過程における課題について考察する。

(1) 継続時間別年最大雨量データの収集

アンケートにおいて資料を貸与可能とされた都道府県から継続時間別の年最大雨量を入手した(21自治体, 106観測所)。その他、大阪管区気象台に保管されている全国の地方気象台発刊の100年誌(名称, 作成年次は様々)から、記載のある範囲で各年最大の10分雨量, 時間雨量, 日雨量を収集した(15府県の地方気象台, 19観測所)。収集した年最大値雨量データの総数は47,464データであり、データ系列数(観測所数×継続時間帯数)は929系列であったので、1地点1継続時間に対する1系列当たりの標本サイズの平均は51.1年である。

(2) 継続時間別雨量データの特性

収集した年最大値雨量データから、継続時間ごとの特性を把握するため、各観測地点における10, 30, 60分, 2, 3, 6, 24時間雨量(2, 3時間は120, 180分雨量も含む、また24時間は日雨量も含む)の最大値および歪み係数を抽出した。表-1, 表-2に継続時間別年最大値の最大値および歪み係数の特性値を示す。10, 60分年最大値雨量について、図-2に最大値の度数分布図に示した。表-1及び図-2に示したような継続時間別の最大値の分布はデータの蓄積をさらに進めることにより、今後の確率雨量評価の目安の1つになろう。また、表-2に示した歪み係数の平均値は継続時間の増加にともない増加し、最小値, 最大値も概ねその傾向がある。収集データには標本サイズの小さい地点も含まれるし、例外的な地点もあるため、一様に当てはまるわけではないが、全体の傾向として継続時間ごとの分布特性が、短時間から長時間になるにつれ、あたかも上限値を有するような分布から確率密度分布図において右側に裾の広い分布に変化していることが予想される。

表-1 継続時間別年最大値の最大値の統計的特性

	地点数	平均	最小値	最大値	分散	標準偏差
10分雨量	98	26.7	15	61	36.83	6.07
30分雨量	78	55.9	33	88	156.33	12.50
60分雨量	124	80.8	39	150	472.80	21.74
120分雨量	93	117.2	55	218	1524.15	39.04
180分雨量	105	152.5	71	360	3324.76	57.66
6時間	52	190.3	108	452	5215.75	72.22
24時間	81	310.8	153	802	13760.05	117.30

単位:mm

表-2 継続時間別年最大値の歪み係数の統計的特性

	地点数	平均	最小値	最大値	分散	標準偏差
10分雨量	98	0.727	-0.229	2.694	0.2704	0.5200
30分雨量	78	0.873	-0.217	2.028	0.2160	0.4648
60分雨量	124	0.929	-0.135	2.238	0.1742	0.4174
120分雨量	93	1.007	0.118	2.437	0.2487	0.4987
180分雨量	105	1.112	-0.14	3.672	0.4158	0.6449
6時間	52	1.301	-0.149	4.711	0.6055	0.7782
24時間	81	1.313	0.071	5.897	0.6569	0.8105

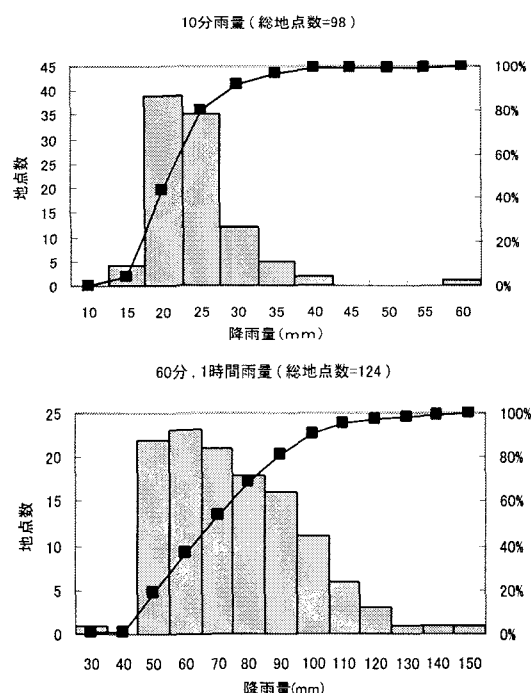


図-2 10, 60分雨量年最大値の最大値度数分布

(3) 確率分布形の適合度による選択

確率雨量の設定は、種々の確率分布形の中から適当な形式を選択するのであるが、宝ら⁶⁾はこの選択において、SLSC等による適合度の評価とリサンプリング手法による安定性の評価を指標として提案しており、実際の河川計画立案時にも適用されている。現今の河川計画のマニュアル⁷⁾によれば分布形選択の手順は、まず極値分布に属するゲンベル(GUM)、一般化極値(GEV)、平方根指数型最大値(SQET)の各分布形について適合度をSLSCを指標として評価する。SLSCの値が0.04以下の分布形について安定性の評価を行い、リサンプリングによる推定誤差が最も小さい分布形を選択するというものである。本論文では紙面の都合から特に適合度に着目して確率分布形の選択手順について検討した結果のみを示す。

収集したデータの中から、4つ以上の時間帯の継続時間別雨量のある観測所100箇所について、適合度の評価

表-3 全継続時間で $SLSC \leq 0.04$ を満足した観測所数

LN3	GUM	GEV	SQET
66	13	42	9

を行った。確率雨量の選定は、評価対象が年最大値という極値であることから、極値分布形に属する GUM (PWM 法)、GEV (PWM 法)、SQET (最尤法) を候補分布形として挙げ、またこの 3 分布形から選択できないことも想定されるため、収集データに対して別途試算した統計解析の中で良い適合結果が得られた 3 母数対数正規分布 (最尤法) (LN3) を比較のために併せて候補分布形とした。

表-3 は、100 箇所の評価地点において、全ての継続時間で $SLSC$ が 0.04 以下となった分布形ごとの地点数である。(2) の継続時間別データ特性でも示したように継続時間によって標本の特性が変化する傾向が見られるため、2 母数である GUM や SQET に比べ、当然 3 母数の GEV、LN3 分布が適合度の面で有利である。

しかし全 100 地点の内、いずれの分布形でも全継続時間を通して適合度が評価基準以下とならない地点が 28 地点あった。この場合、候補となる分布形の中から相対的に良いものを選択する方法と、継続時間ごとに適合度の良い確率分布形を組み合わせる方法が考えられる。前項で示したように対象地点によって継続時間ごとに分布特性が異なることは十分考えられるため、適宜分布形を選択する方法も誤りではないと思われるが、実際には、同一地点では一つの確率分布形とした方が無難である。その理由は、① 3 母数の分布形であれば、自由度が高く幅広いデータに対応できる、② 継続時間ごとに甲乙付けがたい分布形が複数出現することも多く各時間帯で最適な分布形を選択することは難しい、ためである。分布形選択は、基本的には 1 分布形とし、明らかに適当でない時間帯については、より適した別の分布形を採用するという方法が適当であろう。

なお、確率分布形を適合度が悪いというだけで機械的に棄却するのは適当でない場合もある。例えば、図-3 は中国地方のある観測所における 2 時間雨量の解析結果であり、一見 SQET だけが大きくはずれているように見える。しかし $SLSC$ の値は、LN3 : 0.029, GUM : 0.035, GEV : 0.044, SQET : 0.044 と求められ、適合度のみを見ると実際にはそれほど悪くない GEV 分布も棄却候補となってしまふ。こうしたケースは本検討においていくつか確認されている。特に降雨強度式の作成においては各継続時間を総合して確率分布形の採用を決定する必要があるので、ある時間帯の適合度の数値だけにより棄却するのではなく、確率紙上での目視により採用の適否について吟味すべきであろう。

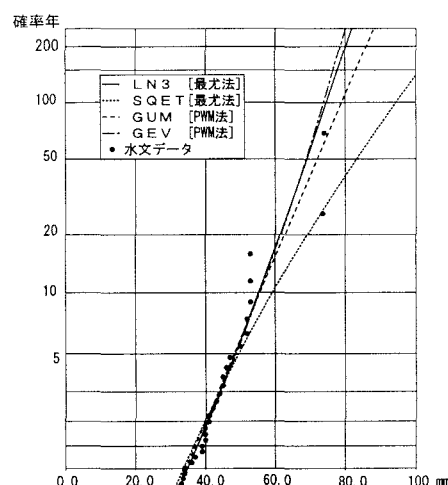


図-3 中国地方 2 時間雨量の統計解析結果例

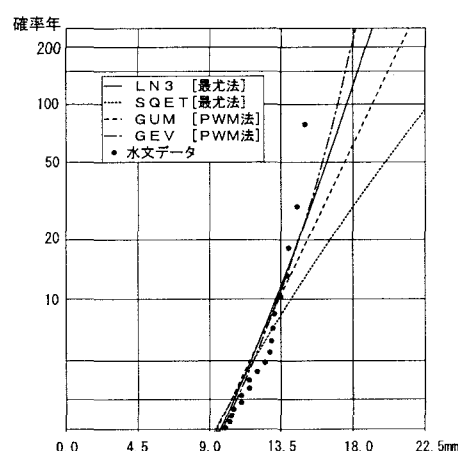


図-4 実績 10 分雨量年最大値に対する解析結果

(4) 既往最大値更新の可能性を考慮した選択

3 母数の確率分布形は自由度が高く、標本の歪みにもよく追従する。図-4 は、東北地方のある観測所における 10 分雨量の解析結果であるが、実績雨量の既往最大は 15mm であり LN3、GEV の分布は下に凸な形状である。この実績雨量に対する $SLSC$ の評価は、LN3 : 0.033, GUM : 0.048, GEV : 0.038, SQET : 0.058 と求められた。一方、全国の 10 分雨量年最大値の度数分布を図-2 に示しているが、15mm 以上の降雨量となる可能性は非常に高いと言える。仮に翌年に 24mm (隣接観測所の既往第 2 位に相当する) があつたとすれば、解析結果は図-5 のようになり結果的に一番変動が少なかったのは GUM 分布ということになる。

将来雨量を予測し、採用することは極端な例ではあるが、分布形の選択に困惑するような場合、国内あるいは近傍の年最大値の発生状況から将来的な更新の可能性も見据えて、確率分布形を選定する観点も必要と思われる。

(5) 確率降雨強度式の形式選択

アンケート結果から、降雨強度式の作成は、現在式(4)の君島型が最も一般的に用いられている。3 定数型の降

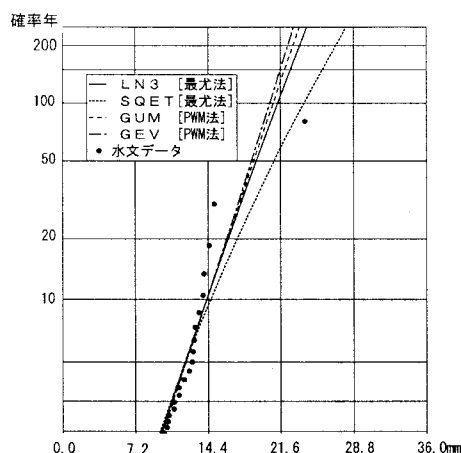


図-5 既往最大値を更新するデータを追加した場合の解析結果

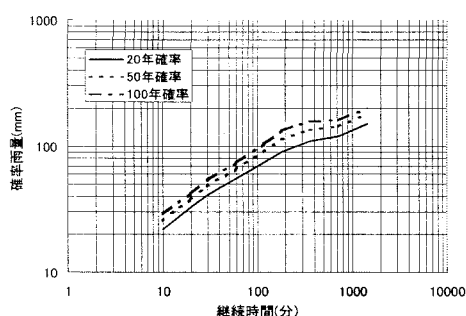


図-6 確率雨量－継続時間関係図

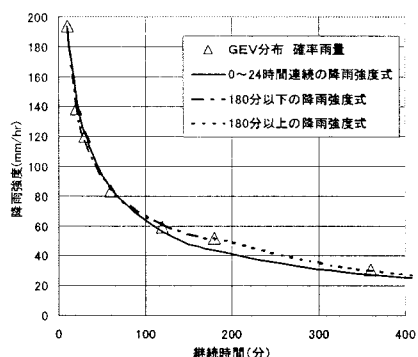


図-7 継続時間に応じた降雨強度式区分の有無による降雨強度の差

雨強度式は2定数型の式に比べ精度が高いため、式(4)と式(1)～(3)を比較する必要は無い。比較するならば式(5)(6)が比較候補であるが、実際に本検討で行った比較結果では、式(4)～(6)の差異は、確率分布形の違いによる確率雨量の差異に比べて小さなものであった。

ただし、継続時間の長さに応じて降雨強度式を変化させるかについては注意すべきである。図-6は、ある地点におけるGEV分布での確率雨量－継続時間の関係に対数グラフに表したものであるが、図では180分の時点で降雨強度の屈曲点を確認できる。このような場合は屈曲時点において降雨強度式を変化させ、より適合度の高い式になるよう留意すべきである。アンケートでは降雨強度式を継続時間に応じて変えないとする回答が7割であ

ったが、屈曲時点を無視して全継続時間を1本の連続な降雨強度式とすれば、屈曲時点付近で評価された確率雨量が反映されない降雨強度式となる可能性が高いためである(図-7)。

5. まとめ

本論文では確率降雨強度式について、最近の水文統計解析の動向を踏まえて検討した。本論文での成果をとりまとめると以下のようである。

- ・アンケートにより全国の確率降雨強度式について、その作成時期、作成条件を明らかにした。結果は3.に示したとおりである。
- ・収集した年最大雨量データから継続時間別の年最大値の分布を示すとともに、歪み係数の継続時間に伴う変化について示した。全国的に継続時間別年最大値の分布状況を整備することは今後の計画雨量作成時の目安になると思われる。また、歪み係数の変化からは、継続時間別降雨の分布特性の違いを傾向として把握できた。
- ・確率分布形の選択において、適合度のみから機械的に判断することが適当でない事例、他地点での既往最大値を参考にする事例を示した。
- ・降雨強度式の選択において、継続時間の長さに応じて式を変更することも重要であることを示した。

今後は、確率雨量の推定精度向上のため、今回21自治体の整理にとどまった継続時間と降雨量との関係について、よりデータを蓄積するとともに、降雨特性の地域解析により地域と降雨量との関係把握、さらには面的な確率降雨の分布特性について探っていきたい。

謝辞：本論文の作成にあたり、全国47都道府県の河川計画御担当課様には、業務ご多忙の中、アンケートにご回答頂きました。また、本研究は、土木学会水工学委員会河川懇談会共同研究の成果の一部であることを付記します。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 岩井重久、石黒政儀：応用水文統計学、1970
- 2) 田中礼次郎、角屋 睦：降雨強度式に関する研究、農業土木学会論文集、No. 83, pp.1-8, 1979
- 3) 君島八郎：地表水 改版、1935
- 4) Murugesu Sivapalan, Günter Blöschchl: Transformation of point rainfall to areal rainfall, Journal of Hydrology 204(1998) pp.150-167
- 5) 建設省河川局編集：改訂河川計画業務ガイドライン、1990
- 6) 宝 馨、高埴琢馬：水文頻度解析における確率分布モデルの評価規準、土木学会論文集 第393号 pp.151-160, 1988
- 7) 財団法人 国土開発技術研究センター：高水計画検討の手引き(案)、2000

(2004.9.30 受付)