

水工学シリーズ 09 - A - 7

地球温暖化問題への対応

中央大学 理工学部都市環境学科 教授

山田 正

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2009 年 8 月

地球温暖化問題への対応

Mitigation and Adaptation of Global Warming

山 田 正

Tadashi Yamada

1. はじめに

地球温暖化は将来の地球の生態環境及び人間の生活を脅かす問題である。IPCC 第 4 次評価報告書¹⁾によると地球温暖化に伴う気候変動により海面水位上昇、台風の巨大化、渇水・洪水リスクの増加、人間・自然システムの崩壊など様々な諸問題が発生するといわれている。今、温室効果ガス排出量がゼロになったとしても大気中に減損する温室効果ガスが減少することがない限り、地球温暖化が終わることはない。温暖化問題は人類の行く末を考える上で不可避であり、数 100 年スケールの問題である。本稿では著者が地球温暖化に関連して取り組んでいる事柄について、成果の一部を以下の項目の順序で述べる。

- 2 章 地球温暖化に伴う気候変動に起因する水災害
- 3 章 ドップラーレーダを用いた集中豪雨の観測
- 4 章 近年の降雨量分布の特徴と降雨量分布の統計学的特長
- 5 章 都市域における雨水排水計画案とその効果
- 6 章 洪水調節機能向上のためのダムからの新しい放流手法の提案
- 7 章 土木学会の地球温暖化適応策への取り組み

2. 地球温暖化に伴う気候変動に起因する水災害

(1) 地球温暖化による影響

第 4 回 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル)によると大気や海洋の世界平均温度の上昇と、世界平均海面水位の上昇が観測されており、地球全体が温暖化していることと報告されている。気温の上昇は過去 100 年間の線形の昇温傾向でみると 100 年当たり 0.74°C であり、海面水位の上昇と整合性がある。

20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇の原因のほとんどは、人為起源の温室効果ガス(二酸化炭素(CO_2)、メタン(CH_4)、亜酸化窒素(N_2O)、ハイドロフルオロカーボン類(HFCs)、パーフルオロカーボン類(PFCs)、六フッ化硫黄(SF_6))、特に二酸化炭素の増加によってもたらされた可能性が高い。

温室効果ガスによる太陽エネルギーの適度な吸収がなければ水の蒸発という地球上における水循環のポンプアップ機能がなくなり、蒸発できない水は雲になることもなく地表面で凍りつくことになる。それどころか温室効果ガスがなければ、たちまち地球全体はマイナス 18°C の世界になるといわれている。適度の温室効果が我々に様々な恵みを与えてくれている。しかし温室効果ガスが増加することによって過剰な熱エネルギーの吸収をすると、そのエネルギーの発散のために海面上昇、台風の強度増加といった現象が起こると考えられる。すべて水に関わる現象である。地球温暖化問題とは水問題そのものなのである。

(2) 地球温暖化による気候変動を起因とした災害

異常気象により人類が脅かされている。単に地球温暖化現象がこれら上記現象を発生させた主要因とはいきれないが、現象の助長をさせていることは間違いない²⁾。(豪雨の現状に関しては3章で述べる。)

具体的な例を挙げればヒマラヤの高山地帯では一年を通じて解けることのなかった雪原地帯が地球温暖化によって雪原を形成する標高(雪線)が上がってきている。つまり年々、雪の融雪量が増加し、氷河湖ができる。その氷河湖は氷河によって削り取られた土が天然のダム(モレーン)を形成し、そこに水が溜まることでできるが、このまま地球温暖化が進めば水がモレーン内に浸透することと、水量が増加することで強度が保てなくなり崩れることが懸念されている。現在、3000 個以上の氷河湖が確認されており、最大の氷河湖では水深130 メートルのものがある。氷河湖が決壊したことで、すでに何万人もの命が失われている。

海面水位の上昇により沿岸地域の海面水位よりも低い都市いわゆるゼロメートル地帯の水害リスクは上昇している。

時空間的に大雨リスクが上昇する地域と時期があるのに対して、そのバランスを保つかのように少雨になる地域と時期ができるとされている。世界をみれば隣国の中国では、中国全土で水不足が深刻化し、100 万都市である 32 都市のうち 30 都市が慢性的な水不足であり、過剰揚水、用水効率の低さ、工場排水による水質汚染が水不足をさらに深刻化させている。アメリカでは 50 州のうち 36 州が 2013 年までに水不足が深刻化し危機的状況に陥ると GAO (米国会計検査院) が警告している³⁾。人間は食料がなくとも 30 日は生きることができるが水がなければ人は 3~7 日で死に至る状態になるといわれている⁴⁾。歴史をみると人々は水のために争いをしてきたことが多々あり、渇水リスクが高い地域では水のための戦争がこれから増加することが考えられる。地球温暖化問題は様々なリスクを含んだ大問題なのである。

(3) 気候変動に伴う近年の河川流量の変化

地球温暖化により融雪時期が早まり将来的には現状の施設運用では渇水地域が増加するといわれている。日本の阿賀野川を例に論じてみる。図 2-1 は 1950 年代と 1990 年代の 2 月から 6 月までの 10 年間平均の平均日流量を比較した図である。この図から平均日流量のピークは $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 減少し、融雪出水のピーク時期が早くなっていることがわかる。次に日平均流量を 86400 倍 (24 時間×60 分×60 秒) したものを総流量と定義し、融雪出水時期の総流量をしてみる。図 2-2 は 10 年間平均の総流量を示している。1950 年代と 2000 年代を比較すると約 1 割流出量が減少している。

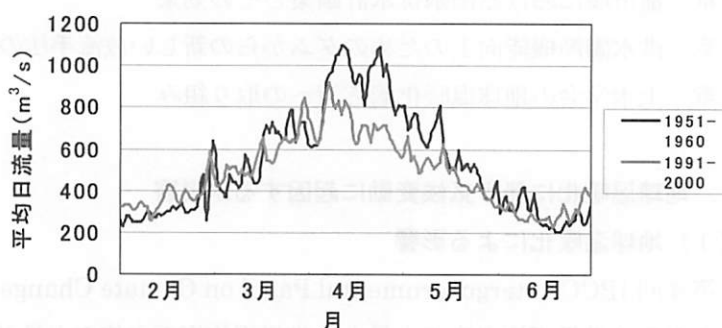


図 2-1 阿賀野川馬下観測地点における 2 月から 6 月までの 10 年間平均の平均日流量

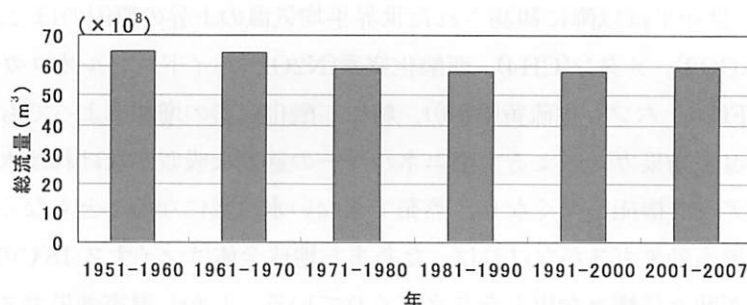


図 2-2 阿賀野川馬下観測地点における 10 年間平均の 2 月 1 日～6 月 10 日までの融雪出水期 131 日間の総流量

3. ドップラーレーダを用いた集中豪雨の観測

近年、狭い範囲に短時間に大雨をもたらす局所的集中豪雨が多発しており、それによって引き起こされる土砂災害や内水氾濫等、多くの被害が生じている。2008 年を例に挙げると時間雨量 50 mm以上の降雨の発生回数が 180 回を超えたが、日雨量 200 mm以上の降雨の発生回数は過去 30 年間の平均発生回数よりも少なく、短時間での強雨の発生が多い年であった。人的な被害が大きかった主な集中豪雨には、7 月 28 日の近畿地方・北陸地方豪雨、8 月 5 日の東京都豊島区を中心とする集中豪雨、8 月 26～31 日の平成 20 年 8 月末豪雨がある。特に、2008 年 8 月 5 日に東京都豊島区で発生した集中豪雨では下水道の工事現場で 5 名の死者が出た。その後の裁判において「自然現象による急激な増水を予見することは困難」との東京地検の見解から、工事責任者は不起訴になっており、これから増加するといわれている突発的に発生する豪雨を正確に観測しかつ予測することが急務である。この章ではドップラーレーダの観測結果から集中豪雨の特徴について述べる。

1995 年から東京都文京区の中央大学後楽園キャンパスに X バンドドップラーレーダを設置して降雨観測を行っている。観測範囲は半径 128 km、周波数 9445MHz、波長 3.2 cm、観測分解能は距離方向に 250m、角度方向に 0.7 度、レーダ換算定数は $B=200$ 、 $\beta=1.6$ である。図 3-1 は 2005 年 4 月 28 日 14 時と 14 時半のレーダ画像である。また、図 3-2 はこのときの A-A' 断面の降雨強度と水平距離の関係を表している。この図から集中豪雨は瞬間降雨強度が 1 km にも満たない範囲で瞬間降雨強度 50 mm以上の降雨をもたらしたことが分かる。また、このようなピーク降雨強度を示す地点においても数十分経てば 20 mm以下の降雨強度になってしまう。著者らが所有するドップラーレーダは観測分解能が距離方向 250m、角度方向 0.7 度と高分解能で観測でき、かつリアルタイムに観測できることからこのような特性を持つ集中豪雨の発生から発達・消滅に至るまでの一連の過程を観測することができる。

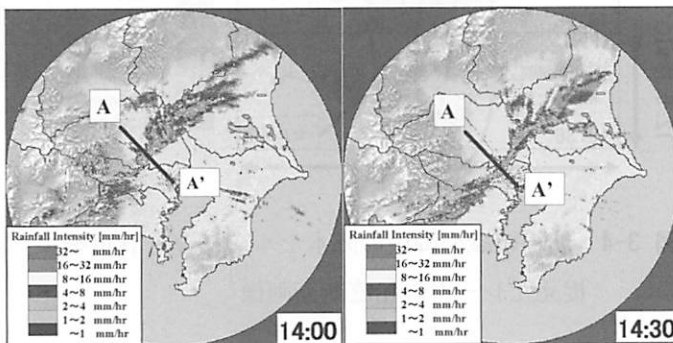


図 3-1 2005 年 4 月 26 日のレーダ画像
(左図:14 時、右図:14 時 30 分)

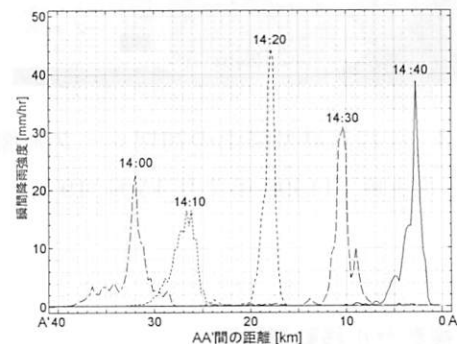


図 3-2 AA'間における各時間の降雨域
の場所と瞬間降雨強度

過去、15 年分のデータを基に解析した結果、集中豪雨をもたらす降雨には 4 つのパターンに分類が可能である^{5) 6)}。近年、日本で多発している数 km から十数 km という局所的な範囲に豪雨をもたらす発生から 1 時間程度で消滅してしまう雷雨性豪雨は前線組織型、複数セル移動型、単一セル型の 3 つのパターンがある。この 3 つのパターンは降雨のスケールが 20 km ～ 200 km の大きさの降雨現象で発生する。また、長時間にわたり広い範囲に大量の雨を降らせる集中豪雨には線状降水帯による集中豪雨がある。このパターンは前線や低気圧のような降雨のスケールが 200 km ～ 2000 km の大きさの降雨現象で生じる。以下に各タイプの特徴を述べる。

(1) 前線組織型降雨

このタイプの降雨は関東平野の北部(群馬県北部、栃木県北部)や西部(秩父・奥多摩山系)の山地から東京湾に向けてフロント面を形成しながら東京湾へ向かい移動するものである。図 3-3 は 1996 年 7 月 15 日の前線型降雨の初期のレーダ画像である。夏期の関東平野における前線組織型降雨は、境界層に吹く海風によ

り上昇風が生じて群馬県の山間部に発生するか、もしくは海風と山風の衝突により発生している。図 3-4 はレーダによる方位角 350 度での雨域の鉛直断面の時系列を示している。図 3-4 では海風は図の左から右へ、すなわち南東から北西方向へ進入しており、雨域は海風の進行方向とは逆方向に進行している。この時の偏西風により上空 6km 以上の雨域は南東に移流されている。さらに図 3-4(a) では発生したセル I のエコーの中心は 10 分後の図 3-4(b) では約 5km 南東方向に移動している。この時系列画像から次に生じる新たなセル II は雨域の冷氣外出流が海風と衝突し上昇流を生じさせ、生成すると考えられ、それにより前線面を前進させている。一つのセルの発生から衰退まで約 20-30 分ばかり、セルの交代時間はおおよその半分の約 15 分であり、その間、降雨セルの中心は約 5km 移動する。移動速度はこのようなセル交代により決定され、東京湾岸まで南方に移動した。この前線組織型降雨の代表例としては 2000 年 8 月 9 日に東京都石神井で時間降雨量 59 mm をもたらした豪雨や 2002 年 8 月 1 日に埼玉県久喜市で 1 時間降雨量 49 mm をもたらした豪雨がある。

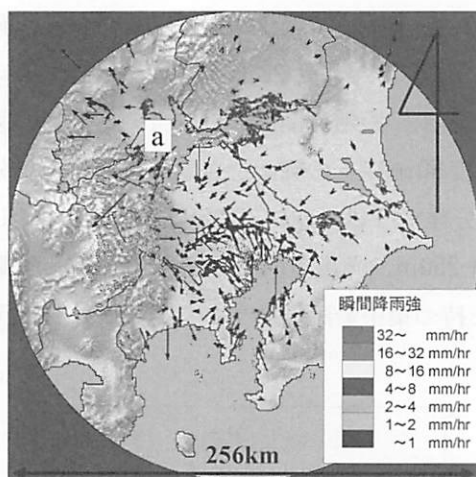


図 3-3 前線組織型降雨の初期レーダ画像と地上風（1996 年 7 月 15 日 19 時）

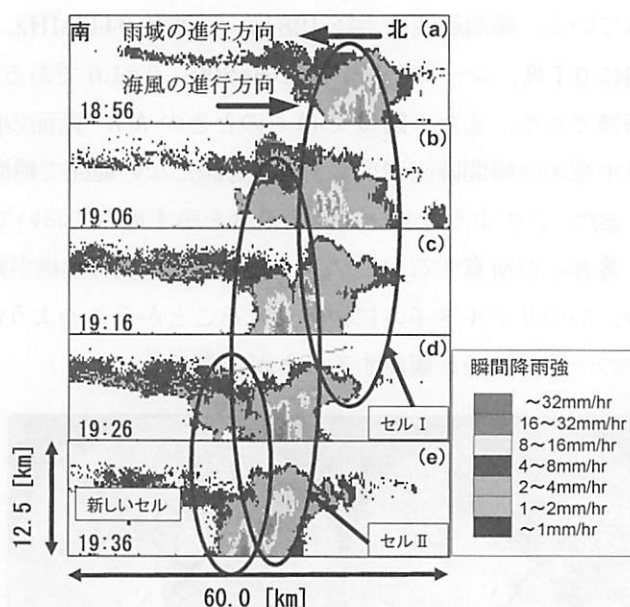


図 3-4 前線組織型降雨の降水セルの発達・衰退を捉えたレーダの鉛直断面画像

(2) 複数セル移動型降雨

図 3-5 は複数セル移動型降雨のレーダ画像である。このタイプの降雨は降水セルの移動方向と同じ方向に帯状に雨域を延ばし、関東平野の広い範囲で降雨をもたらすものである。図 3-6 は 1997 年 8 月 3 日のレーダによる降雨の鉛直断面の連続画像である。17:30 には発達したセルの高度 8km よりも高い高度で雨域は移流

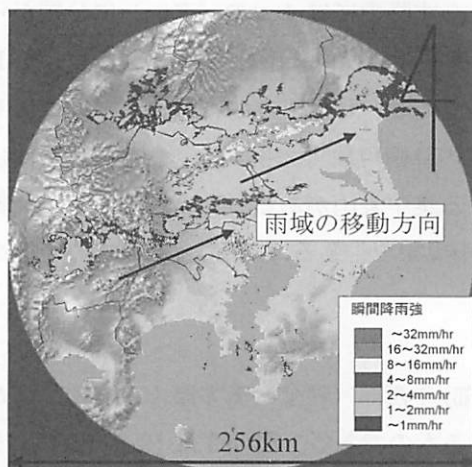


図 3-5 複数セル移動型降雨の最盛期の雨域と地上風（1997 年 8 月 13 日 19 時）

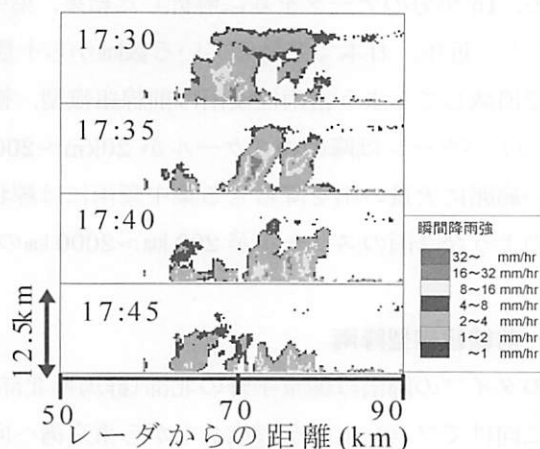


図 3-6 複数セル移動型降雨の連続レーダ鉛直断面画像

されており、次の降水セルによる降雨を引き起こしているように見える。この降雨タイプは帯状雨域が長軸方向に移動し、直下で継続した降雨をもたらすことにより狭い地域に長時間にわたって非常に強い降水量をもたらす可能性がある。この複数セル移動型降雨の代表例としては2001年7月18日に東京都赤塚で時間雨量109mm、総降雨量115mmをもたらした豪雨がある。

(3) 単一セル型降雨

図3-7は単一セル型降雨のレーダ画像である。この画像から5~15kmの雨域を形成し、瞬間降雨強度32mm/hr以上の強い降雨をもたらしている。このタイプは上記の2つの降雨型に比べると、雨域の時間スケール、空間スケールがともに小さい。この型の降雨は発生と衰退が数十分であるいわゆる熱雷と、前線組織型降雨発生時の前後で突然、首都圏に発生する降水セル、さらに低気圧や寒冷前線の通過に伴う対流性降雨の3つが存在する。発生位置は広範囲にわたり、かつ連続的である。このタイプの豪雨の代表例としては1999年7月21日の練馬豪雨や2008年8月5日の東京都豊島区を中心に発生した豪雨がある。雷雨の発生場所と発生時間をプロットしたものが図3-8である。発生地点の定義はレーダ画像から雨域の発生が確認できた雨域の瞬間降雨強度が32mm/h(レーダ反射強度68dBZ、 $(B, \beta)=(200, 1.6)$)となった地点とする。組織的な雨域から10km以内に雨域が発生し瞬間降雨強度32mm/h以上となる地点は除いている。関東北部の山岳域の斜面、東京西部の山岳域で多く発生していることがわかる。また、発生時刻は8割以上が午後に発生している。著者らはこれらの地域で発生した雨域が都心あるいは都心付近に移流してくることを数多く観測している。

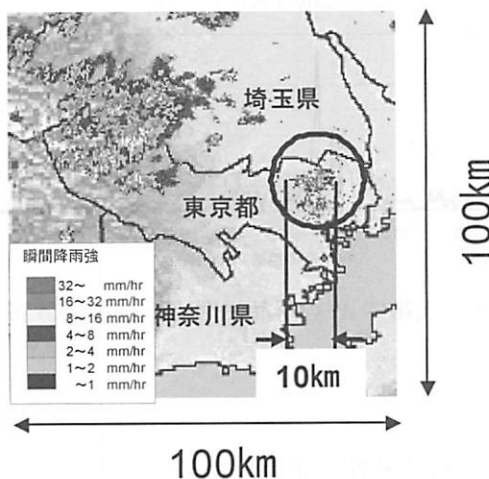


図3-7 単一セル型降雨のレーダ画像
(1999年7月21日14時55分)

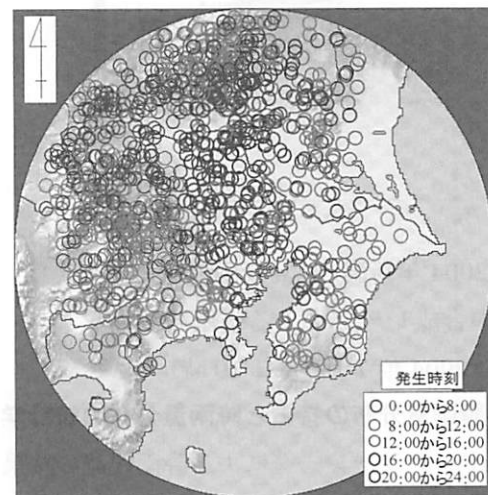


図3-8 雷雨性降雨の発生場所と発生時刻

(4) 線状降雨帯による集中豪雨

このタイプの豪雨は積乱雲が線状に並び新しく発生した積乱雲を吸収・併合しながら線状の雨域を維持し、同一地点に長時間留まるものである。吉崎らの既往の研究より⁷⁾線状降雨帯による集中豪雨によって大きな被害が発生していることがわかっている。表3-1は2000年以降で線状降雨帯により発生した集中豪雨の概要を表している。図3-9は線状降水帯による集中豪雨を捉えたレーダ画像である。幅15km、長さ100kmに達した線状の降水帯が3時間にわたり停滞して、豪雨をもたらした。また図3-10は同様に線状降水帯により生じた2004年の新潟・福島豪雨のレーダ画像である。長さ400kmにもなる線状の降水帯が形成されている。図3-11は図3-9のa-a'断面の降雨強度を表している。線状降水帯の中で瞬間降雨強度が32mmを越える雨域の長さが10km以上ある。線状の降水帯は広い範囲に強い雨をもたらせることから、大きな被害をもたらせる可能性が高い。既往の研究から低気圧の中心付近や寒冷前線、停滞前線の前線上、台風の影響下での湿った空

気が流入する領域で発生することがわかっている。このタイプの降雨の代表例としては2000年9月11日の東海豪雨や、2004年7月13日の新潟・福島豪雨、2008年7月28日の近畿地方・北陸地方で発生した豪雨がある。

表 3-1 2000 年以降の線状降雨帯による集中豪雨

(吉崎正憲、加藤輝之：「豪雨・豪雪の気象学」より抜粋し加筆)

発生場所	冠名	発生日	環境場	降水量
愛知県	2000年東海豪雨	2000.9.11～9.12	台風からの暖湿気流入域	名古屋：日降水量428mm
千葉県	2001年佐原豪雨	2001.10.10	発達中の低気圧	佐原：1時間降水量153mm
福岡県太宰府市	2003年福岡豪雨	2003.7.19	寒冷前線	大宰府：日降水量315mm
熊本県水俣市	2003年熊本豪雨	2003.7.20	梅雨前線の南側	水俣市：日降水量228mm
静岡県	2004年静岡豪雨	2004.7.30	台風からの暖湿気流入域	静岡市：日降水量368mm
新潟県中部	2004新潟・福島豪雨	2004.7.13	梅雨前線	栃尾：日降水量422mm
福井県	2004年福井豪雨	2004.7.18	梅雨前線	美山町：日降水量285mm
東京都内	2005年首都圏豪雨	2005.9.4	台風からの暖湿気流入	綾馬：日降水量113mm

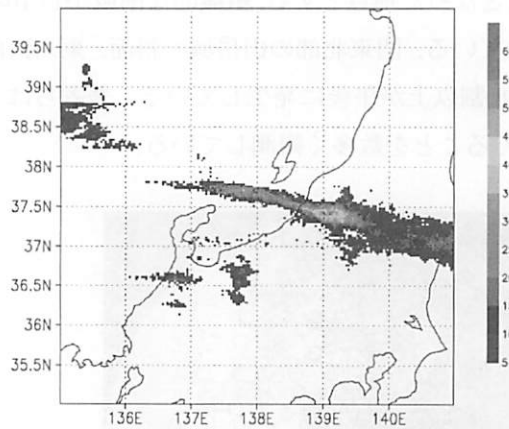


図 3-10 2004 年新潟・福島豪雨の気象庁全国合成レーダによる降雨観測結果
(2004 年 7 月 13 日 10 時)

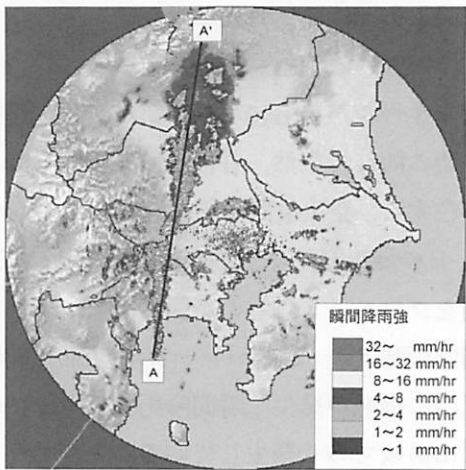


図 3-9 線状降雨帯のレーダ画像
(2003/8/8 13:10)

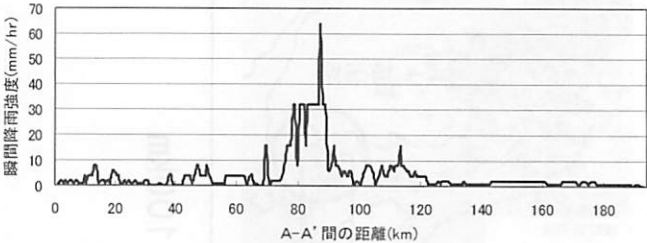


図 3-11 線状降雨帯の A-A' 断面瞬間降雨強度の分布

4. 近年の降雨量分布の特徴と降雨量分布の統計学的特長

前章ではドップラーレーダによる降雨観測の結果について述べた。降雨特性の経年的な変化が指摘される中で、本章では地上雨量計による降雨観測から関東域での近年の降雨特性を明らかにすることを目的としている。また、大雨の発生頻度に対して新記録の出現頻度という観点から理論的な考察を加える。

(1) 関東域における 10 年間最大降雨量の地域特性

関東域の各観測所における 10 年間最大降水量の空間分布を図 4-1 に示す。図中の●で示す観測所は、各観測所の 10 年間最大降雨量が全地点の 10 年最大降雨量の平均より多い地点を示している。△で示す観測所は、10 年間最大平均降雨量が全地点の 10 年最大年間降雨量の平均より少ない地点を示している。観測時間が 10 分、30 分間の 10 年間最大降雨量では、全地点平均より高い値を示す地点が関東地方の中央部、東京都心部に分布し、少ない地点は関東北部、西部の山間部、房総半島、関東平野東部に分布していることがわかる。観測時間が 6 時間、12 時間、24 時間の 10 年間最大降雨量は、関東平野の中央部、東京都心部、関東平野東部で少ない値を示す地点が分布していることがわかる。関東域の各観測時間における 10 年間最大降雨量の月別出現地点数を図 4-2 に示す。いずれの観測時間の 10 年間最大降雨量は、7 月、8 月、9 月、10 月に出現し

ている。出現のピーク月は10分間、30分間、1時間では8月に、6時間、12時間、24時間では9月である

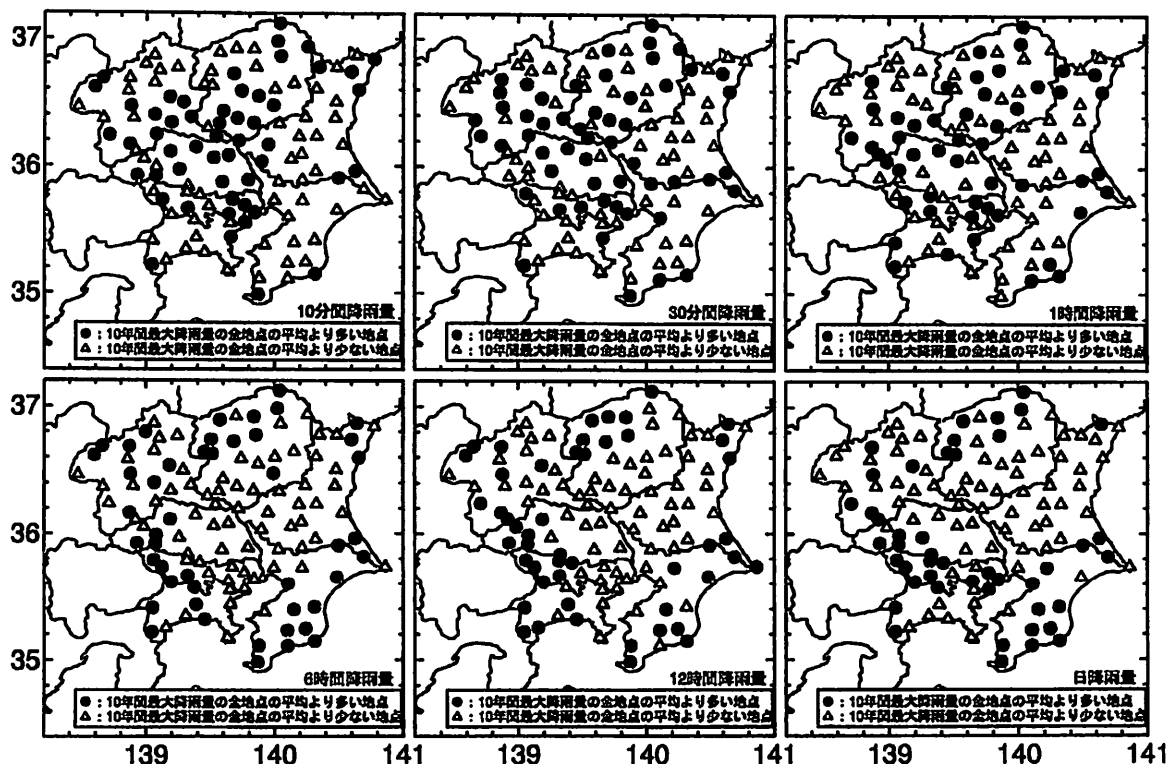


図 4-1 各観測時間における降雨量の10年間最大日降雨量の分布

ことがわかる。

以上の結果から、関東域内においては10年間最大降雨量の最大値と最小値は、10分間降雨量では約3倍、24時間降雨量で約5倍の違いがある。1時間平均降雨強度では、観測時間が10分間の場合は168mm/hr、24時間の場合は、20.6mm/hrの差がある。10年間最大雨量の空間分布は地域性があり、観測時間によりその特徴が異なることがわかる。観測時間が短い降雨については、平野部で降雨量が多くなり、山間部では相対的に少なくなる。観測時間が長い場合には、山間部で多く、平野部で相対的に少なくなる。

(2) 新記録の出現理論

各年の降雨の記録について年最高記録に注目する。このとき最初の年の記録は最高記録である。もし年毎の統計特性に変化がなく、各年の最高記録が同一の連続分布に従うものとするならば*i*年目の最高記録が新記録になる確率は1/*i*になる。1,2,...,*i*年目のうちどれかが最大になるかはすべて等確立でその確立は1/*i*に等しいからである。

確立変数 X_i を

$$X_i = 1 : i \text{ 年目の記録が新記録であるとき} \quad X_i = 0 : \text{新}$$

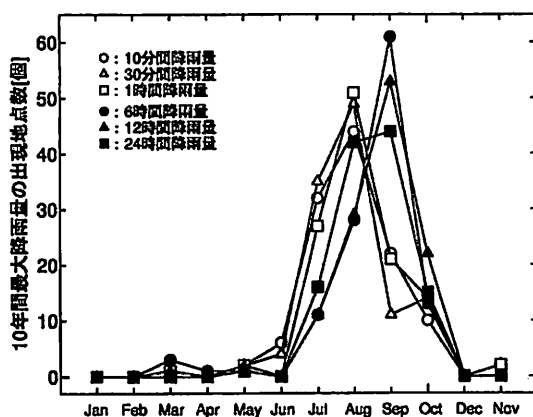


図 4-2 月別10年間最大降雨量の出現地点数

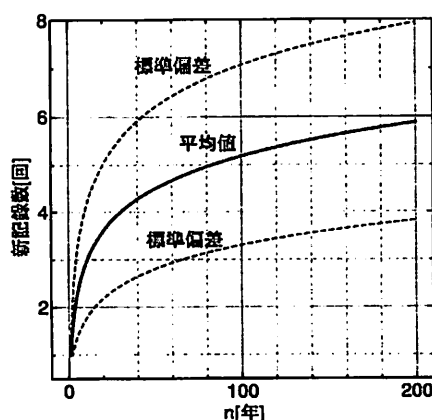


図 4-3 新記録の出現理論による平均と標準偏差

記録でないとき

と定義すると、それらの確立はお互いに独立で

$$P\{X_i = 1\} = 1/i, \quad P\{X_i = 0\} = (i-1)/i$$

となり、それらの期待値と分散は

$$E(X_i) = P\{X_i = 1\} = 1/i$$

$$V(X_i) = E(X_i^2) - E(X_i)^2 = P\{X_i = 1\} - P\{X_i = 1\}^2 = (i-1)/i^2$$

となる。ここで n 年間の新記録数を R_n とすると

$$R_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$$

であるから、その期待値と分散は

$$E(R_n) = 1 + 1/2 + \dots + 1/n$$

$$V(R_n) = 1 + 1/2 + \dots + 1/n - 1 - 1/2^2 - \dots - 1/n^2$$

とあらわされる（竹内ら（1988））。 $n = 200$ までのこの関係を示すと図 4-3 のようになり、200 年間で、約 6 回の新記録が出現することがわかる。

（3）年最大日降雨量の新記録出現理論の適用

上記の新記録の理論の発生頻度理論と雨量観測所における実測データから得られた降雨の新記録の発生頻度との比較を行う。ある雨量観測所 A での年最大日降雨量の経年変化を図 4-4 に示す。解析対象データは 1935 年から 1998 年までの 63 年間の年最大日降雨量のデータを用いた。年最大日降雨量の平均値は 137 mm，新記録の発生回数は 7 回であった。また各年から n 年間（ $n=10, 20, 30$ ）の新記録回数の経年変化を図 4-5 に示す。それらの平均値と新記録の発生頻度理論から得られる期待値との比較を図 4-6 に示す。この結果より実測データから得た新記録数の平均値は理論から算出した新記録数の期待値の標準偏差内にある。雨量観測

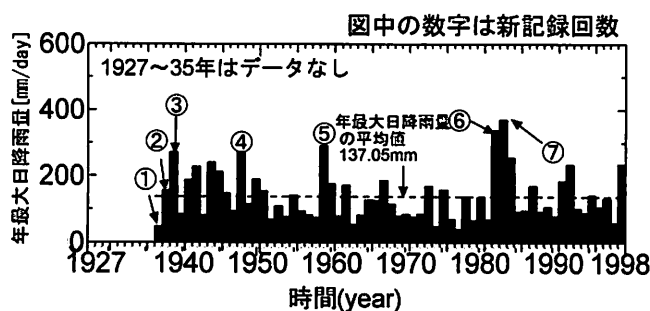


図 4-4 年最大日降雨量の経年変化

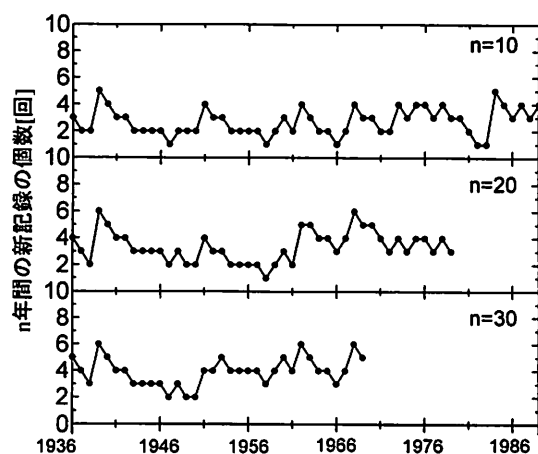


図 4-5 n 年間における新記録回数の経年変化

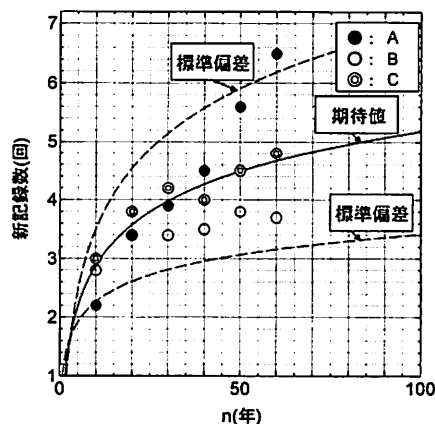


図 4-6 新記録数の期待値と実測データから得た新記録数の平均値との比較

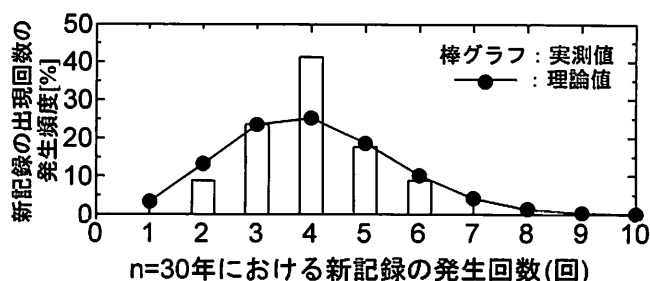


図 4-7 $n=30$ 年としたときの新記録回数の発生頻度理論に基づく理論値と実測値の分布図

地点により新記録出現頻度の傾向は異なる。また、実測から得られた新記録回数の平均値は n が大きくなるにつれて期待値から新記録回数が多い方へ推移することがわかる。次に n を 30 年とし、その雨量データから得られた発生頻度の確率分布と新記録発生理論から得られる発生頻度の確率分布を図 4-7 に示す。雨量データから得られた確率分布は、新記録発生理論の頻度分布と多少の差はあるものの理論値の分布形状と全体的に良く一致している。

次に、近年の降雨の降雨継続時間の違いと日本の各地域における新記録の発生頻度について述べる。1976 年から 2004 年までの気象庁の AMeDAS で観測された雨量データを用い、各気候区ごとに 1 時間、3 時間、6 時間、12 時間、24 時間、48 時間雨量の新記録の発生回数を整理し、上記の理論との比較を行い、新記録の発生状況についての検討を行った。気候区分を図 4-8 に示す。各降雨継続時間ごとの結果を図 4-9 に示す。1 時間雨量、3 時間雨量、48 時間雨量における新記録の発生回数は、どの気候区分においても理論値の標準偏差内に入っていて、地域区分によるばらつきが小さい。気候区分 3, 4, 8, 9

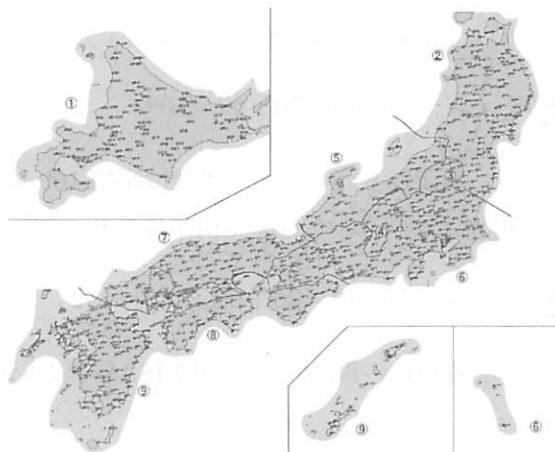


図 4-8 気候区分図

においては 6~24 時間雨量の新記録発生回数は理論値よりも多くなっている。気候区分 3, 4 は内陸の標高の高い地域であり、気候区分 8, 9 は台風の影響を受けやすく、かつ山地斜面が太平洋側に面している特徴がある。著者の既往の研究から、継続時間の長い降雨の降雨量は地形の標高と共に増加するという結果が得られており、このため気候区分 3, 4 では地形の影響により、気候区分 8, 9 では台風と地形の影響により降水量が増加しやすいため、新記録が発生しやすいと考えられる。

ここで、「1901 年から現在まで最大日降雨量は過去 6 回塗り替えられている（新記録数=6 回）。この記録

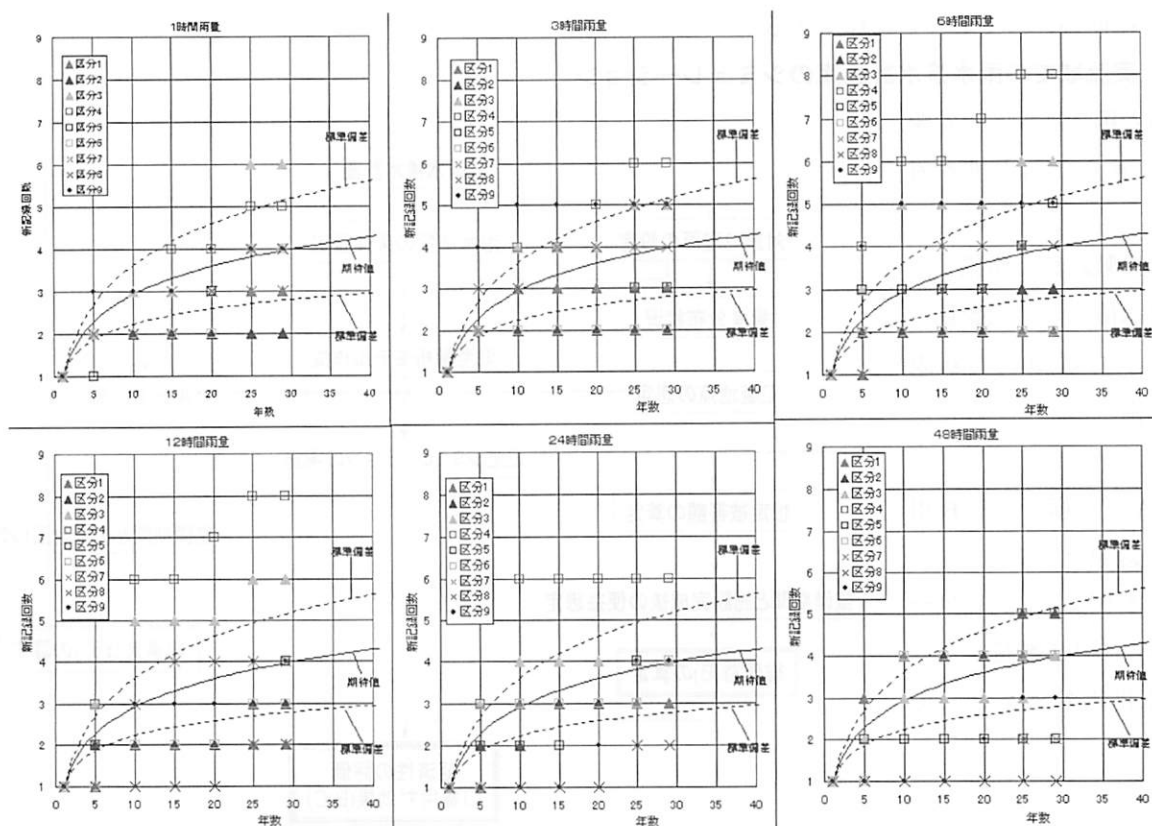


図 4-9 各気候区分の新記録出現頻度

が塗り替えられるには今後何年を要するか？」という問題を設定する。Nr を記録を取り始めてから r 回目の新記録達成までに要する年数とすると、 W_r は r 回目から r+1 回目の新記録が出るまでに要する年数 ($W_r = N_r + 1 - N_{r-1}$) となる。

$$r, N_r, W_r / W_{r-1}$$

の関係を示すと表 4-3 になり、 W_r/W_{r-1} は、 $e=2.718$ の等比級数となる。

ここで、上記に設定した問題について、

$$\sum_{r=1}^5 W_r = N_6 = 4 + 10 + 26 + 69 = 109$$

となり、新記録 6 回を要する年数は平均 109 年となる。さらに、「次（7 回目）の新記録が更新されるのに要する年数は 6 回目から数えて何年後か？」について、

$$\sum_{r=1}^6 W_r = N_7 = 4 + 10 + 26 + 69 + 183 = 292$$

となり、6 回目の新記録から平均 183 年後ということになる。

5. 都市域における雨水排水計画案とその効果

（1）雨水排水計画案と費用対効果の概要

都市域における水災害の軽減対策として、定量的な評価および効率的な検討として費用対効果を用いた雨水排水対策を検討する。A 市排水計画における費用対効果は「治水経済調査マニュアル（案）平成 17 年 4 月」を基に算定した。費用対効果における総費用および総便益の調査手順を図 5-1 に示す。調査の基本的な考え方としては、雨水排水施設の整備および維持管理に要する総費用と、雨水排水施設整備によってもたらされる総便益（被害軽減）を、社会的割引率を用いて現在価値化して比較する。このため、評価時点を現在価値化の基準点とし、雨水排水施設の整備期間と施設の完成から 50 年間までを評価対象期間にして、雨水排水施設の完成に要する費用と施設の完成から 50 年間の維持管理費の総和から総費用を、整備前後における被害軽減額を総便益としてそれぞれ算定する。

（2）実流域での雨水排水計画案のシミュレーション

A 市の第 2 排水区を対象

として考えた雨水排水対

策案は、

- ・ 管渠敷設替え整備
- ・ 排水機場の新設整備
- ・ 地下貯留施設の新設整備

である。

また、A 市を横断する B 川流域を対象として、

- ・ 外水門（ポンプゲート）の新設整備

を雨水排水対策案として考えた。

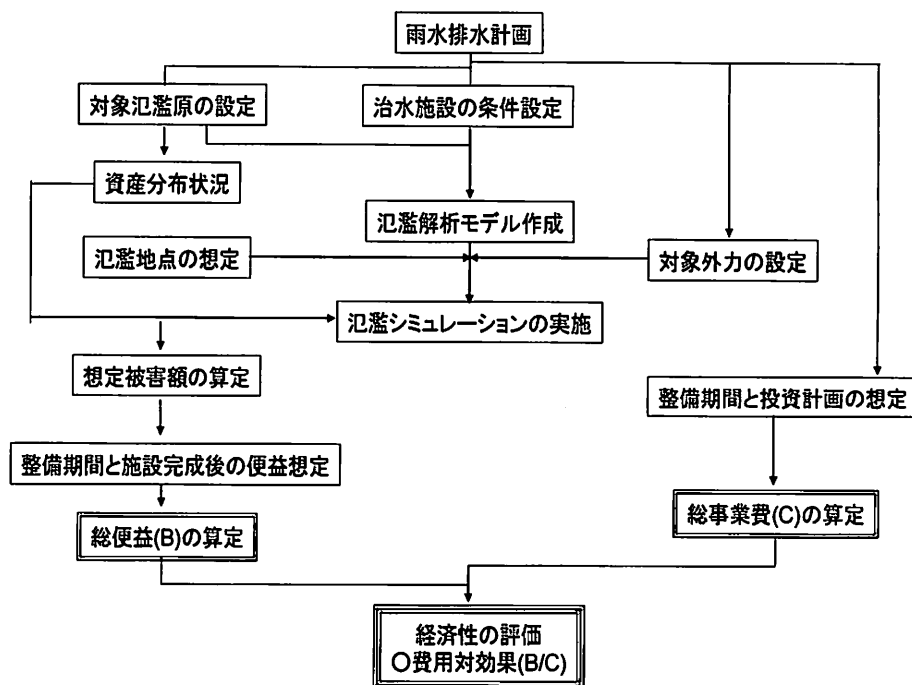


図 5-1 雨水排水計画の手順

ここで、管渠の敷設替え整備とは既設管渠の能力調査の結果、管径・勾配の不足している箇所については、管渠を太いものや勾配を是正するために入れ替えを行う。上下流の管渠状況により、入れ替えが困難な箇所については、バイパス管として新たに管渠を追加する整備である。

表 5-1 対象とした降雨の総降雨量とピーク降雨強度

	基準降雨	1割増加した降雨	2割増加した降雨	3割増加した降雨	4割増加した降雨	5割増加した降雨
総降雨量[mm]	60	65	71	77	83	89
ピーク降雨強度[mm/hr]	20.7	22.8	24.9	27.0	29.0	31.1

排水機場整備とは国土交通省揚排水機場設備点検・整備指針（案）によると「経済的耐用年数＝40年」とされており、現実にはそれ以上の長期間使用されるものが多いというのが現状である。そこで、既設の排水機場がある場合にはポンプの運転能力を増強し、既設の排水機場がない流域においては新たに排水機場を設置する。地下貯留施設の整備とは管渠対応困難箇所において公園やグラウンドの地価に貯留施設を設けて一時的に流量のピークカットを行うものである。

今後、地球温暖化の影響を受けて降雨の極端化現象になり、降雨強度が増加すると懸念されている。そこで、設定した外力である計画降雨に対して費用対効果を算出して効率的な雨水排水対策を検討するが、設定した計画降雨の降雨強度を 1.1 倍、1.2 倍、1.3 倍、1.4 倍、1.5 倍した降雨を作成して将来降雨強度が増加した場合も考慮したうえで効率的な雨水排水対策を考えた。基準として設定した計画降雨は、総降雨量 60mm、ピーク降雨強度 20.7mm/h の降雨とした。

また、基準降雨とその降雨の 1.1 倍、1.2 倍、1.3 倍、1.4 倍、1.5 倍した降雨の総降雨量とピーク降雨強度を表 5-1 に示した。

各降雨は降雨継続時間を 1 時間とし、10 分間ごとの降雨強度として設定した。また、降雨波形の作成において、タルボット式の降雨強度式を用いて作成した。用いた降雨強度式は東京都で用いている 60mm/h 対応の降雨強度式である。

第 2 排水区において、雨水排水対策案として考えたのは管渠敷設替え整備、排水機場新設整備および地下貯留施設新設の整備とそれぞれの組み合わせた合計 7 通りの整備とした。その整備のパターンを以下に列挙する。

(i)管渠敷設替え整備、(ii)排水機場新設整備、(iii)地下貯留新設整備、(iv)管渠敷設替えおよび排水機場新設整備、(v)管渠敷設替えおよび地下貯留施設新設整備、(vi)排水機場新設整備および地下貯留施設整備、(vii)管渠敷設替え、排水機場新設整備および地下貯留施設新設整備

現況の管路網システムにおける流出計算・氾濫計算およびこれらの整備のパターンの流出計算・氾濫計算を行うことにより、各雨水排水対策の検討および効果の評価を行った。

(3) 雨水排水計画案の効果

現況の管路整備および各種雨水排水対策案における氾濫計算結果より、浸水深ごとに被害額を算出した。現況の管路整備および各種雨水排水対策案における降雨の規模と被害額の関係を図 5-2 に示す。現況の管路整備および各種雨水排水対策案における氾濫計算結果より、各種雨水排水対策は降雨の規模が増加するとともに被害額は増加していることがわかる。これは氾濫計算結果からもわかるように、降雨の規模が増加するとともに最大の湛水深および湛水面積が増加しているからである。ここで、注目すべきは基準降雨から 2 割増加した降雨のときに現況の管路網整備よりも管渠敷設替え整備を行ったときのほうが被害額が大ききことである。これは、整備前よりも整備後のほうが浸水による被害が大ききということである。氾濫計算結果をみると、整備前の現況の管路網における湛水面積よりも整備後の管渠敷設替え整備の湛水面積のほうが小さい。しかしながら、整備前の現況の管路網における最大湛水深は整備後の管渠敷設替え整備の最大湛水深の

ほうが大きい。このことから、整備により湛水面積は減少したものの最大の湛水深は大きいことにより被害が拡大したとわかる。このように、整備の種類および適用箇所によっては整備後のほうが浸水による被害が拡大する可能性もあるということがわかった。また、このことは降雨の規模によっても変わってくるということもわかる。

また、被害額の比較だけでは各種整備のコストに対する効果を評価しにくい。ため費用対効果を用いて評価する。そこで、総便益として整備前後における被害軽減額と定義した。つまり、整備前の現況の管路整備における被害額から各種雨水排水整備後における被害額を差し引いた額を便益とした。各種雨水対策における降雨の規模と便益費との関係を図 5-3 に示す。その結果、全体的に降雨の規模が増加するとともに右肩上がりで便益費が増加している。特に、管渠敷設替え、排水機場新設および地下貯留施設新設整備を同時に行った対策における便益費がいずれの降雨の規模のときも大きく被害の軽減額が大きいことがわかる。また、基準降雨から 2 割増加した降雨における管渠敷設替え整備の便益費をみるとマイナスの値である。これは整備前の被害額より整備後の被害額のほうが大きいからである。

今までは便益費だけをみてきたが、各種整備のコストの比から対策の効果をみるため各種整備の費用を表 5-2 に示す。各種整備に対する整備費用をみると、管渠敷設替え整備の費用が一番安価であり、次に地下貯留施設の新設整備、一番整備費用が高いのがポンプ場の新設整備であることがわかる。このように、整備メニューによりコストが変わってくるため費用対効果で各種対策の効果を評価しなければ各対策の被害額が軽減しても効率的な対策を見極めることができない。また、費用対効果で整備の効果を評価することにより、整備メニューの優先順位を決定することができる。

(4) 費用対効果を用いた評価

雨水排水計画案における降雨の規模と費用対効果の関係を図 5-4 に示す。その結果、費用対効果の値が 1 以上の効果が大きい整備メニューは「管渠敷設替え整備」、「地下貯留施設新設整備」および「管渠敷設替えおよび地下貯留施設新設整備」である。他の「排水機場新設整備」、「管渠敷設替えおよび排水機場新設整備」、「排水機場新設整備および地下貯留施設新設整備」および「管渠敷設替え、排水機場新設整備および地下貯留施設新設整備」も費用対効果が 0 以上であることから被害は軽減するがコストに対する効果としては小さ

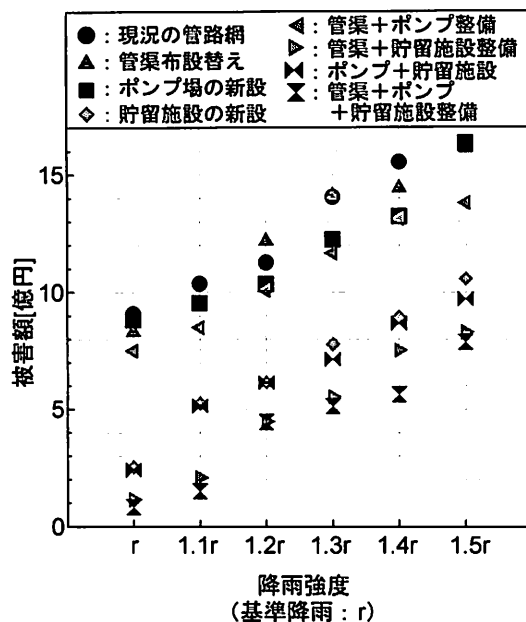


図 5-2 降雨の規模と被害額の関係

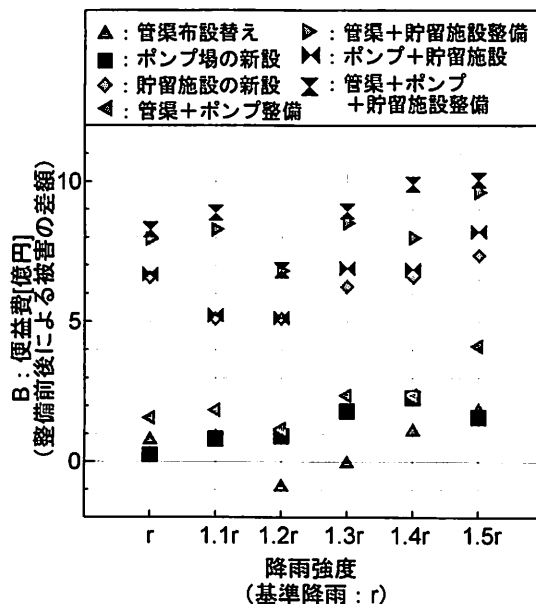
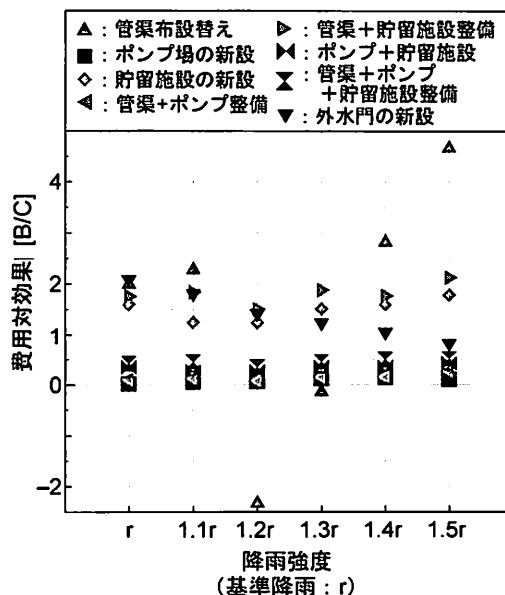


図 5-3 降雨の規模と便益費との関係

表 5-2 各種整備の費用

整備メニュー	整備費用
管渠敷設替え	3.12[千万円]
ポンプ場の新設	12[億円]
地下貯留施設の新設	3.3[億円]
外水門の新設	136.4[億円]

いことがわかる。このことから、対象とした流域においては効率的な雨水排水対策は「管渠敷設替え整備」、「地下貯留施設新設整備」および「管渠敷設替えおよび地下貯留施設新設整備」であるとわかる。また、全ての整備を実行する場合においても、この結果から費用対効果の値が1以上の整備メニューから行えば整備期間中に洪水がきたとしても被害をより軽減することができる。また、管渠敷設替え整備は降雨の規模により費用対効果の値が他の整備メニューの費用対効果の値と逆転している。このことから、設定する計画降雨により適した整備メニューが異なることがわかる。



6. 洪水調節機能向上のためのダムからの新しい放流手法の提案

図 5-4 降雨の規模と費用対効果の関係

(1) 本章の概要

洪水対策においてダムのゲート操作は大きな役割の一つを担う。近年、かつての洪水常襲地帯における宅地開発、流域の土地利用の変化、降雨形態の変化等があり、既存ダム群の従来通りの運用だけでは頻発する豪雨災害に必ずしも対応できなくなりつつある。現行のダム操作規則による放流操作は、時々刻々の流入量データを基に行っているが、近年増加傾向にある大規模な出水に対応するためには、ダム貯水池からの放流操作に関して今まで以上に効率的な操作を行うことで、ダムの洪水調節機能を最大限に発揮する必要がある。本章では治水容量に加えて利水容量分も放流することでダム貯水池のもつ治水効果を向上させる手法を用いて、ダム流域の流域特性に基づく放流量の決定手法を提案する。本手法は時々刻々の累積降雨量や流入量から、それ以降に最低限流入する総量を放流するというものであり、これを山田方式⁸⁾と定義する。この考えに基づいて、事前放流により洪水以前には貯水位を低下させ、洪水終了後には貯水位を事前放流以前の水位まで回復させることができる。用いた累積降雨量については実測降雨だけでなく予測降雨も用いることによって、本提案が現実的に適応可能な手法であることを示した。

(2) 提案する事前放流手法

図 6-1 はあるダムにおけるピーク流入量と流入量のピーク時から4日間の総流入量の関係である。この関係は降雨が止んだ時点以降に、流量逓減部のみからダム貯水池へ流入する総量を示している。図 6-1 よりダムの利水容量に相当する流量が洪水の逓減部に流入していることがわかる。この関係が山田方式による事前放流量の決定手法の原点であり、非常に重要である。この関係は、ダムの利水容量分を洪水発生以前に事前放流し貯水池を空にしても、洪水逓減部で確実に利水容量分を溜め込むことが可能である事を意味する。現状では、ダムの利水容量は水利権の問題等により、洪水調節に用いることが不可能であるが、この利水容量分を一時的に洪水調節に用いることが出来れば、個々のダムの洪水調節能力を向上する事ができる。以下に山田方式の放流量の算出方法の概要を記す。

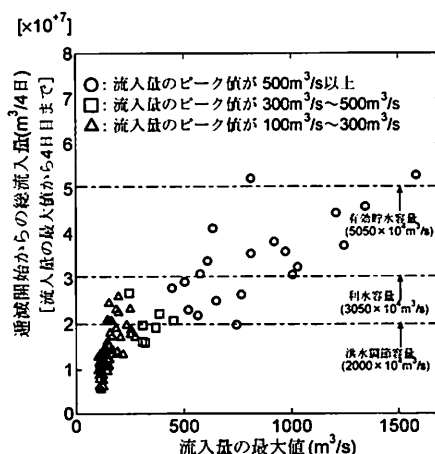


図 6-1 草木ダム流域におけるピーク流入量とピーク以降4日間の総流入量の関係

ダム貯水池における流入量，放流量に関して式(1)に示す連続式を満たすように $Q_{OUT}(t)$ を決める。

$$-\int_0^t (Q_{IN}(t) - Q_{OUT}(t)) dt = V(t) \quad (1)$$

ここに， $V(t)$ ：現時点(=時刻 t)以降に確実にダム貯水池に流入する総流入量(m^3)， $Q_{IN}(t)$ ：ダム貯水池への流入量(m^3/s)， $Q_{OUT}(t)$ ：ダム貯水池からの放流量(m^3/s)である。

事前放流としては，ある時刻における流入量や降雨量などのダム貯水池における水文諸量から，その後最低限貯水池へ流入する総流入量を算出し，それに見合う流量を放流する。よって，事前放流直後に降雨が終了したとしても，貯水位は最低でも所定の水位(夏期制限水位)まで回復する。ここで，放流量の算出に関して $V(t)$ の表し方によって以下に示す3通りの考えがある。

0. 流出計算により算定する

1. 時々刻々の流入量 $Q_{IN}(t)$ の関数で表す：

$$-\int_0^t (Q_{IN}(t) - Q_{OUT}(t)) dt = V(Q_{IN}(t)) \quad (2)$$

2. 時々刻々の累積降雨量 $R(t)$ の関数で表す：

$$-\int_0^t (Q_{IN}(t) - Q_{OUT}(t)) dt = V(R(t)) \quad (3)$$

山田方式に基づく 1. の考えを用いた放流方法を通減特性方式，2. の考えを用いた放流方法を総降雨量方式と定義し，以後この表現を用いる。以下に通減特性方式および総降雨量方式を用いた放流量の算出方法の概要を記す。

① ダム貯水池への時々刻々の流入量を用いた放流量の決定方法（通減特性方式）

ダム貯水池への時々刻々の流入量から放流量を算出する通減特性方式による放流量は式(2)を時間 t で微分して得た式(4)で決定される。

$$Q_{OUT}(t) = Q_{IN}(t) + \frac{dV(t)}{dQ_{IN}(t)} \cdot \frac{dQ_{IN}(t)}{dt} \quad (4)$$

この式(5)を用いるとともに，流域における流入量 $Q_{IN}(t)$ と $V(t)$ の関係図(図 6-2)を事前に作成しておくことで，事前放流量を決定できることが示されている。ここで，この累積降雨量と直接流出量の関係のばらつきが大きいダム流域に対しては，回帰直線の傾きを変化させることで，平均値のライン (LineA)，治水に有利なライン (LineB)，利水に有利なライン (LineC) を定義し用いることができる。どのラインを使用するかはダムの管理者サイドが出水規模，貯水容量，洪水調節の主目的などに応じて決定することができる。通減特性方式では，流入量の立ち上がり時を時刻 $t=0$ と定義する。

② ダム貯水池における時々刻々の累積降雨量を用いた放流量の決定方法（総降雨量方式）

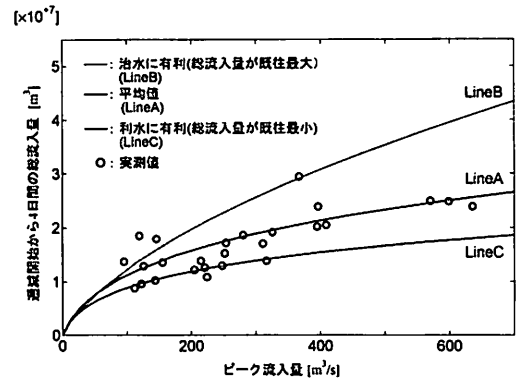


図 6-2 通減開始時の流入量 Q_{IN} とその後 4 日間の総流入量 V の関係

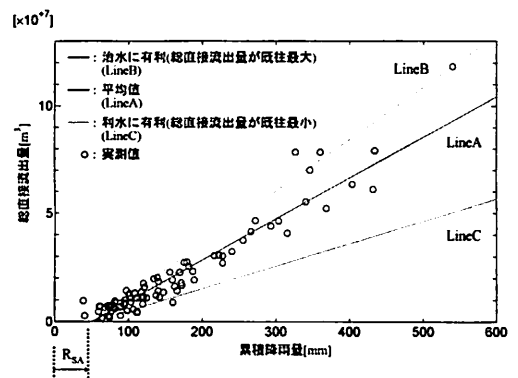


図 6-3 ダム流域における総降雨量 $R(t)$ と総直接流出量 $V(R(t))$ の関係

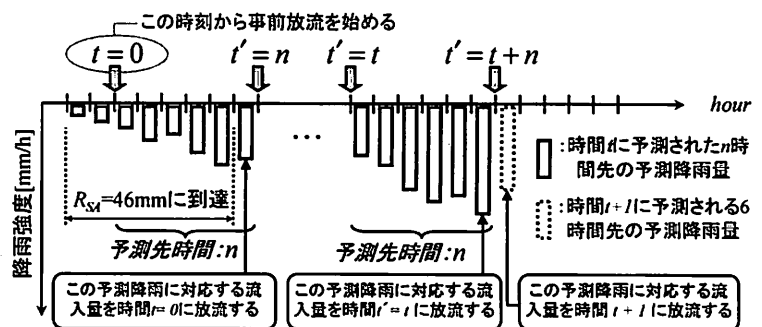


図 6-4 時刻 t において n 時間先の予測降雨を事前放流手法に取り入れる概念図

時々刻々の降雨データ(累積降雨量)を基に放流量を決定する総降雨量方式について述べる。洪水の発生要因である降雨の情報を得る事により、ダム貯水池への流入量を実際に流入が開始する前に算出することが可能である。これにより、さらに効率的な洪水調節を行える可能性がある。

式(4)を時間(t)で微分し、式(5)の $dR/dt=r(t)$ の関係を用いると式(6)が得られる。

$$R(t) = \int_0^t r(t) dt \quad (5)$$

$$Q_{OUT}(t) = Q_{IN}(t) + \frac{dV(t)}{dR(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = Q_{IN}(t) + \frac{dV(t)}{dR(t)} \cdot r(t) \quad (7)$$

ここに、 $R(t)$ ：ダム流域において降雨が開始した時刻から時々刻々の累積降雨量(mm)、 $r(t)$ ：時々刻々の降雨量(mm/h)である。式(7)とともに、図 6-3 に示す草木ダム流域における累積降雨量と総直接流出量の関係を用いることにより dV/dR が決定され、放流量を算出することができる。逓減特性方式で用いた相関図と同様に、平均値のライン (LineA)、治水に有利なライン (LineB)、利水に有利なライン (LineC) を定義し用いることができる。この総降雨量方式では、降雨開始時を時刻 $t=0$ と定義する。ところで、降雨に伴う流出は雨が降った瞬間から始まるものではなく、ある閾値に達しなければ流出は始まらない。この閾値を R_{SA} と定義し、累積降雨量が R_{SA} に到達した時刻を時刻 $t=0$ とした。

また、ダム貯水位に関しては総降雨量方式、逓減特性方式ともに式(7)より算出可能であり、利水容量の安全性も同時に確認できる。

$$A(h) \frac{dh(t)}{dt} = Q_{IN}(t) - Q_{OUT}(t) \quad (7)$$

ここに、 $A(h)$ ：湛水面積(m^2)、 $h(t)$ ：貯水位(m)である。

(3) 予測降雨を用いた総降雨量方式による事前放流手法

上記で説明した総降雨量方式で用いる累積降雨量は従来実測の降雨を用いて行う手法であるが、実際に放流を開始する際には人員の確保や関係機関への放流通知、放流開始の判断や設備点検などに約 3 時間の放流準備時間を必要とするのが現状である。そこで事前放流量を決定する際に、気象庁の降水短時間予報 (30 分間隔で発表され、6 時間先までの各 1 時間雨量を予測する) による予測降雨量の累積値を用いて放流開始を早める。予測降雨量を用いた総降雨量方式による事前放流手法では、時刻 t において n 時間後に降ると予測された雨によって貯水池に入ると想定される量を

時刻 t に放流する。また、累積降雨量 $R(t)$ については n 時間後の予測降雨量の累積のみを用い続ける。予測降雨量を用いた総降雨量方式による事前放流量は、(6)式の t を置き換えた(8)式によって求められる。

$$Q_{OUT}(t) = Q_{IN}(t) + \frac{dV(t')}{dR(t')} \cdot r(t') \quad (8)$$

ここに $t' = t + n$ 、但し $n = 1, 2, \dots, 6$ [hours] とする。図 6-4 にその概念図を示す。

ところで、予測降雨は必ずしも実測降雨と整合するわけではない。予測した降雨量に対して実際の降雨量が少なければ、事前放流後に貯水位は回復しない。逆に実際の降雨量が予測した降雨量よりも多いと、事前

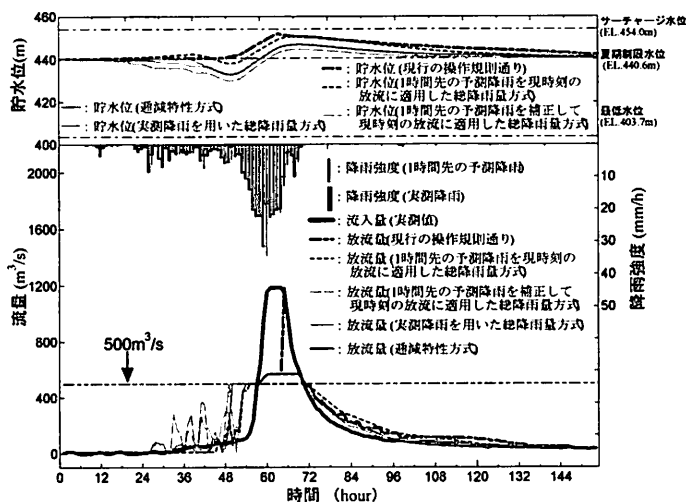


図 6-5 1 時間先の降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列

放流による効果が薄れる可能性が出てくる．そこで著者らは予測降雨を補正して用いることで，より有効に事前放流を行えないか試みる．補正値は過去の同じ時間における予測降雨と実測降雨の差の量を現時間に予測された降雨による放流量に加えた値とし，これを用いて放流する．補正値の算出方法を式(9)に示す．

$$r_c(t) = r_f(t) + (r_o(t-1) - r_f(t-n)) \quad (9)$$

ここに $r_c(t)$ ；時刻 t の放流を算出するための補正値， $r_f(t)$ ；時刻 t において n 時間先に降ると予測された雨量， $r_o(t-1)$ ；時刻 $t-1$ と時刻 t の 1 時間の間に降った実測の単位時間雨量， $r_f(t-n)$ ；時間 $t-n$ に予測した時間 $t-1 \sim$ 時間 t

間に降ると予測された単位時間雨量とする．提案した補正方法は現時刻から先を予測した降雨を補正することはできないが，現時刻までを予測した予測降雨と実測降雨の差を打ち消することができる．

(4) 大規模洪水を対象とした本洪水調節手法の適用

本手法を実際のダムに適応し，実際の洪水のデータを用いて解析を行った．検証するダムの操作規則によると流入量 $500\text{m}^3/\text{s}$ 以上を洪水と定義し，洪水時は式(10)に示すように，流入量 $500\text{m}^3/\text{s}$ を上回った量の 1 割に $500\text{m}^3/\text{s}$ を足して放流する．

$$Q_{OUT}(t) = (Q_{IN}(t) - 500) \times 0.1 + 500 \quad (10)$$

本研究ではこの放流操作を 1 割放流と定義する．この放流は常用洪水吐の操作によって行われるが，ダムが

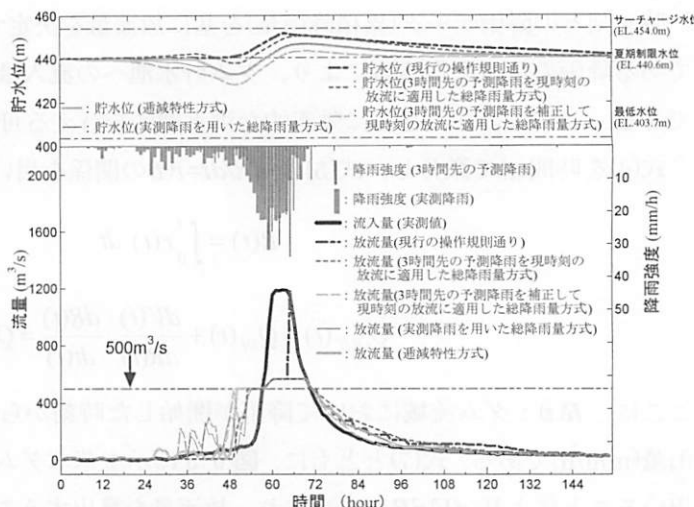


図 6-6 3 時間先の降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列

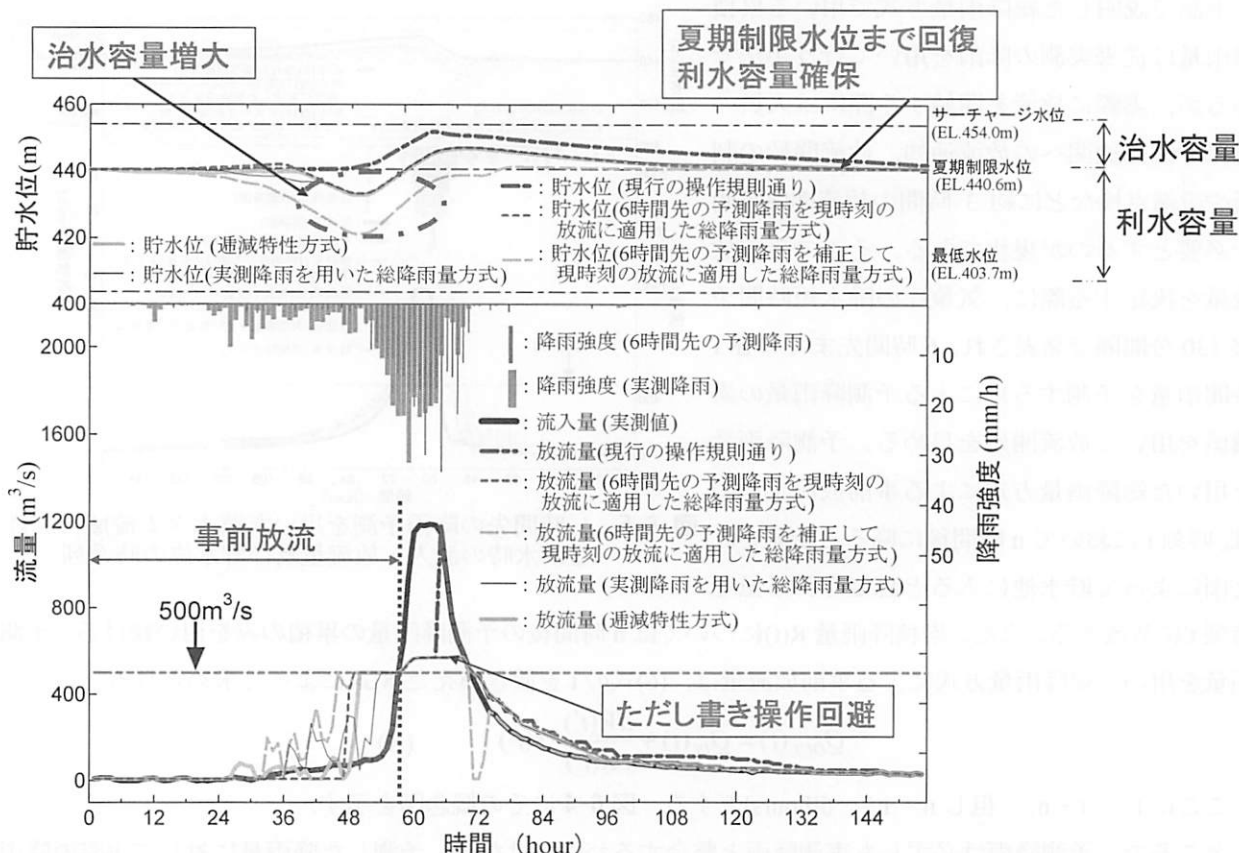


図 6-7 6 時間先の降雨予測を用いた草木ダム流域における洪水時の流入・放流量及び貯水位の時系列

満水に近づくと非常用洪水から流入量と同じ量を放流する、ただし書き操作と呼ばれる運用ルールに移行する。ここで、事前放流手法は現状より効率的に洪水調節を行うことを目的としているため、事前放流量の最大値は、解析対象としているダムにおいて洪水流量と定義されている $500\text{m}^3/\text{s}$ とし、洪水調節開始流量に到達以降は現行の操作規則に従う洪水調節を行った。検証したダム流域における R_{SA} は平均して 46mm である。

図 6-5, 6-6, 6-7 にそれぞれ、1 時間先、3 時間先、6 時間先の降水短時間予報を用いた総降雨量方式による事前放流量を算出した際の流入量、放流量、貯水位の時系列を示す。それぞれの図には実測降雨量を用いた総降雨量方式と逓減特性方式による放流量、貯水位、および対象洪水発生時に実際行われた操作による放流量、貯水位も同時に示す。逓減特性方式及び、総降雨量方式で用いる各相関図(図 6-1, 6-2)においてはそれぞれ平均ラインを用いて計算を行っている。実際の本洪水時の初期貯水位は夏期制限水位より低かったため、ただし書き操作に移行しなかったが、シミュレーションでは初期水位を夏期制限水位に設定しているため、現行操作はただし書き操作に移行している。それに対して、予測降雨量、実測降雨量を用いた総降雨量による事前放流手法、逓減特性方式による事前放流手法は図 6-5, 6-6, 6-7 いずれの場合においても、事前放流を行ったことでダム貯水池への流入が卓越する前に治水容量を増大させて洪水調節に成功し、洪水終了後には利水容量を確保している。その中でも予測降雨量を補正して用いた事前放流は他の事前放流手法よりも多くの量を事前放流できる。これにより検証した洪水においては、最長 6 時間前から洪水に備えることが可能であるとともに、不確実性を伴う予測降雨量を用いたとしても貯水容量を失うことなく事前放流が可能であることを示した。

(5) 本章のまとめ

山田方式による事前放流手法は、ピーク時の流入量とその後に貯水池へ入ってくる総流入量の関係を用いた逓減特性方式、予測降雨・実測降雨に基づいた総降雨量方式、どちらの場合も、ダム貯水池への流入が卓越する前に治水容量を増大させて洪水調節に成功し、洪水終了後には利水容量を確保することを示した。よって提案する事前放流手法はいかなるダム流域においてもその流出特性を明らかにすることで適用することができる、最も単純かつ合理的な方法と言える。

予測降雨を補正して用いた事前放流手法は治水容量を大幅に確保できるので、予測降雨を補正して用いた事前放流が最も効果的であり、最大 6 時間前から洪水に備えることが可能であることを示した。以上より山田方式による事前放流手法は、ゲート操作に 3 時間の準備時間がかかる現状において非常に有効であり、現実的な放流手法と考えられる。

7. 土木学会の地球温暖化適応策への取り組み

著者は土木学会地球温暖化特別委員会適応策小委員会委員長として地球温暖化による影響とその適応策について取りまとめ、2009 年 5 月に報告書を仕上げた。以下にその概要を示す。

(1) 賢い選択と粘り強い適応に基づく持続可能な社会

・水の安全保障

地球温暖化と気候変動に対する適応策に関する基本的哲学として「水の安全保障」の考え方がある。この場合「水の安全保障」の考え方は以下のように定義される。すなわち字義通りの狭義の意味での

(1) 水災害・水需給・水質・環境・生態系の安全保障

と広義の意味での

(2) 人命、資産と平和に関する安全保障

がある。地球温暖化と気候変動に対する適応策に関する基本的哲学としては、上記(1)の安全保障に加え、食糧・食料とエネルギーの安全保障を前提としつつ、地球温暖化と気候変動の時代に適した生活の質の保障

と向上を担保するものとしての、文化、教育、情報、農林水産業、工業、経済、衛生、医療等の進展が期待され、このもとで広義の意味としての人命、資産と平和に関する安全保障が考えられよう。すなわち持続可能な社会は以下に示す三つの安全保障の確保のもとに達成され、そのもとに平和で活力のある社会が構築される。

- (1) 水の安全保障
- (2) 食糧・食料の安全保障
- (3) エネルギーの安全保障

(2) 地球温暖化と気候変動に関する不確実性と賢い選択

地球温暖化と気候変動は時間的・空間的にも、またその質的・量的にも多くの不確実性が存在することが指摘されている。一方、温暖化と気候変動の有無に関わらず発生する政治情勢の変化、人口の増大や減少、少子高齢化、エネルギーおよび食糧の供給量の変化、経済活動の変化およびそれらに影響を受ける地域社会の構造変化等の社会変化にも現在の我々の知見では予測の困難な数多くの不確実性が存在する。その不確実性の中で地球温暖化と気候変動に対応していくにはさまざまな政策上あるいは技術上の選択肢が必要となり、かつそれらの適切な選択と組み合わせが必要になってくる。水の安全保障に関して言えば、我が国の土木技術者は too much water と too little water に関わる水問題・水災害に関して歴史上多くの成果を挙げ、他国に例を見ない安定した国土の形成に寄与しており、その経験から様々な水に関する解決可能な政策手段と技術的オプションを獲得し、その質を高め、社会変化や地球温暖化の進展に応じた多くの選択肢を提示することができる。

参考文献

- 1) CLIMATE CHANGE 2007 -The Physical Science Basis-, IPCC FOURTH ASSESSMENT REPORT, Technical Summary, pp.19-92, 2007.
- 2) 国土交通省河川局河川計画課資料：地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方，2008
- 3) 吉村和就：巻頭言「水の未来はあるのか 各国の水資源戦略と日本の水戦略」，給排水設備研究会誌，Vol. 26, No. 1, pp. 3-9, 2009
- 4) 吉村和就：カレント寄稿「水と健康」，カレント，第 773 号，pp. 44-49, 2009
- 5) 池永均，久米仁志，森田寛，山田正：ドップラーレーダを用いたメソ β スケール降雨特性の解析，水工学論文集第 41 巻，pp147-154, 1997.
- 6) 志村光一，原久弥，山田正：レーダ雨量計を用いた関東平野における降雨形態の分類と降雨発生メカニズムに関する考察，水工学論文集第 44 巻，pp97-102, 2000.
- 7) 吉崎正憲，加藤輝之：豪雨・豪雪の科学，応用気象学シリーズ，朝倉書店，2007.
- 8) 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，印刷中，2009.
- 9) 江戸川区：江戸川区ハザードマップ，<http://www.city.edogawa.tokyo.jp/>，2009 年現在
- 10) 農林水産省水産庁：平成 14-15 年度地球温暖化に対応した漁場，漁港漁村対策調査総合報告書，2007
- 11) 下水処理水の再利用のあり方を考える懇談会：下水処理水の再利用のあり方に関する懇談会 中間とりまとめ，2008
- 12) 「気候変動等によるリスクを踏まえた総合的な水資源管理のあり方について」研究会：「気候変動等によるリスクを踏まえた総合的な水資源マネジメント」について（中間とりまとめ），2008

- 13) 温暖化影響総合予測プロジェクトチーム：地球温暖化「日本への影響」－最新の科学的知見－2008
- 14) 地球温暖化影響・適応研究委員会：気候変動への賢い適応－地球温暖化影響・適応研究委員会報告書－，2008
- 15) 社会資本整備審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について（答申），2008
- 16) 日本学術会議 地球惑星科学委員会・土木工学・建築学委員会合同 国土・社会と自然災害分科会：提言 地球環境の変化に伴う水災害への適応，2008
- 17) 山田正ら：海陸風の影響による雷雨発生メカニズムに関する研究，第25回関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.256-257，1998.
- 18) 志村光一，森田寛，原久弥，山田正：関東平野における対流性降雨の移動形態に関する研究，土木学会年次学術講演会概要集Ⅱ，pp22-23，1998.
- 19) 国土交通省河川局治水課：平成20年水害レポート2008，2008.
- 20) 湧川勝己，末次忠司：中小河川における計画論及び実効的な減災対策，河川技術論文集，第11巻，pp.19-24，2005年6月
- 21) 呉修一，山田正，吉川秀夫：表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol. 49，pp. 169-174，2005.
- 22) 土屋修一，土肥学，海野修司，山田正：管路網水理解析による都市洪水流出特性に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol. 46，pp. 259-264，2002.
- 23) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル，2005
- 24) 土木学会地球温暖化対策特別委員会：地球温暖化に挑む土木工学，2009
- 25) 戸谷英雄，秋葉雅章，宮本守，山田正，吉川秀夫：ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案，土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, pp.27-40, 2006.
- 26) 腰塚雄太，下坂将史，戸谷英雄，山田正：確率予報を用いたダムによる事前放流量の決定手法に関する研究，第33回関東支部技術研究発表会，Ⅱ，17，2006.