

小流域における水田貯留の洪水抑制効果 に関する現地観測と流出解析

ON-SITE OBSERVATION AND RUNOFF ANALYSIS ON FLOOD CONTROL EFFECTS BY RAINWATER STORAGE IN PADDY FIELDS

原田守博¹・大森美喜夫²

Morihiro HARADA and Mikio OHMORI

¹正会員 工博 名城大学教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

²非会員 農学士 株式会社 アイエスシー (〒466-0059 名古屋市昭和区福江2-9-33)

In order to deal with recent change of runoff characteristics by urbanization of a river basin, construction of facilities for rainwater storage and infiltration has been planned as a flood control measure in the basin. However, the construction plan has not been in progress due to high costs and limited sites for the facilities. In this paper, we propose a new utilization method of paddy fields remained in the basin as an alternative measure. This research aims to evaluate rainwater storage function of paddy fields and to verify a new procedure to improve the function, through on-site observations and simulation analyses. A water-balance model on storage-drainage process in each paddy field is identified based on observed data, and by using a runoff analysis model based on the kinematic wave theory, the runoff processes from a drainage area consists of many paddy fields are simulated for a probabilistic design rainfall. From results of the runoff simulation, it is found out that paddy fields have applicability as the runoff control facilities.

Key Words : *rainwater storage, paddy field, on-site observation, runoff analysis, flood control, urbanization of basin*

1. はじめに

流域における市街地の拡大に伴って、宅地造成や道路舗装・下水道整備等により、河川への雨水流出量が増大するとともに、その流出時間も短縮してきている。こうした都市化に伴う流出特性の変化によって、流域の下流部では洪水氾濫の危険性が増してきている。この事態に対処するため、河川改修に加え、流域からの流出を減少または遅延させることを目的として、総合治水による流域整備計画が策定されている¹⁾。

総合治水対策では、農地や山林の開発を抑制し、流域の保水・遊水機能の保全と回復を図るため、開発面積に応じて雨水貯留浸透施設の設置が求められる²⁾。しかし、新たに流出抑制施設を建設するには莫大なコストがかかり、建設適地も限られるため、整備計画の進捗率は伸び悩む傾向にある²⁾。

そうした現状を踏まえ、流域内で雨水を面的に貯留できるものとして、市街地近郊に現在も残存する水田の流出抑制効果に注目が集まっている。確かに水田は畦畔に

囲まれたプール形状のため、大きな雨水貯留機能をもつと考えられがちである³⁾。しかし水田は、豪雨に見舞われる夏季には稲作のための湛水状態にあり、降雨浸透が期待できないだけでなく、現実には排水路への排水能力も大きいので降雨は速やかに排水され、用水路からの流入も生じているため、期待されるほどの貯留効果が見込めない場合が多い。

そこで著者らは、2004年度より、愛知県を流れる新川上流域に現地観測区域を設置し、実際の水田がもつ雨水貯留機能を評価するとともに、その強化方策について、現地実験を踏まえて実証的に検討してきた^{4), 5)}。著者らの提案する水田貯留機能の強化策とは、①水田の水管理のために普及しつつある「自動給水栓」を取水口に設置することにより、雨天時に用水路から水田への流入を止めるとともに、②落水口には水田から排水路への流出を抑制する簡便な工夫を施す、というものである。

これまでのところ、水田1面における雨水貯留状況と排水路への流出量に対して上記の工夫の有効性を示すことができている⁶⁾が、水田群を主体とする流域全体での流出抑制効果については定量的な評価はされていない。

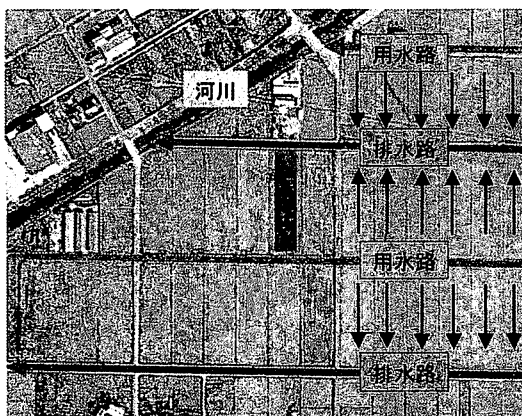


図-1 水田地域の用水路・排水路の形態

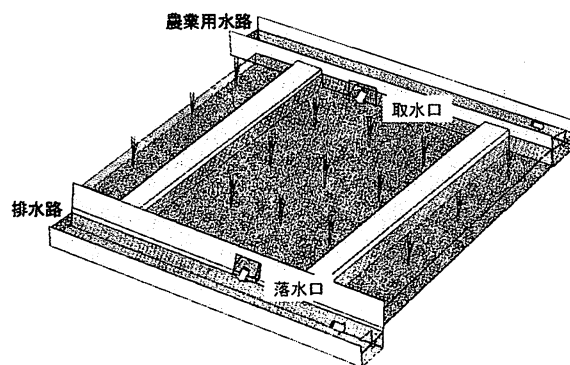


図-2 水田の模式図

そこで本研究では、実験水田を含む排水区域全体を対象に、豪雨に対する雨水流出特性および上記の流出抑制強化策の有効性について、特性曲線法に基づく流出解析を通じて検討を行うものである。

2. 水田における雨水貯留機能の強化方策

(1) 水田地域における用水・排水形態

一般に圃場整備の進んだ水田地域では、図-1 に示すように用水路と排水路が水田群を挟んで設けられ、水田群は標準的な面積（例えば 3000m^2 ）に区画されている。各水田では図-2のように、用水路に面した取水口から灌漑用水を取り入れ、稲作に必要な以上の水量を落水口から排水路へ排出させる。排水路は各水田からの流出水を集め、下流の河川に合流する。営農者は天候に配慮しつつ、水田の水深や水温等が稲作に適した状態を保つように、取水口の開口幅と落水口の越流堰高を調節している。

(2) 雨水貯留機能の強化方策

取水口に設置された水門は手動式であるため、急な降雨時には開いたままである。したがって、水田の雨水貯留量を確保するためには、降雨開始時に取水口を自動的に閉じるバルブを設ける必要がある。筆者らは図-3に示すように、水田の水使用量を節約する目的で開発された「自動給水栓」（綾羽工業製）を取水口に設置すること

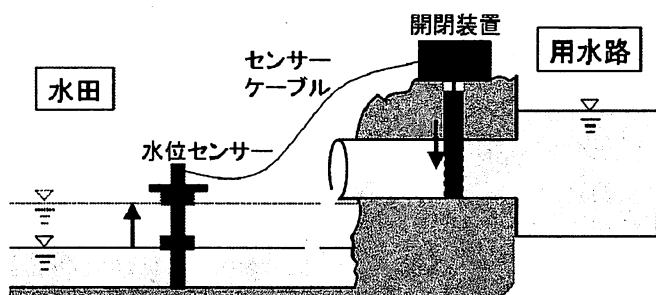


図-3 取水口への自動給水栓の設置

によって、降雨による田面水位の上昇をセンサーで感知し、雨天時の用水路からの水田への流入を阻止することとした。

一方、落水口の形式は「角落とし」と呼ばれる堰板から越流させるものが一般的である。角落とし板は通常20～30cmの幅をもち十分な排水能力があるため、田面に降った雨水は速やかに排水路に流出する。そこで筆者らは、図-4 に示すように、角落としよりも流出幅を狭めた「切欠き板」を落水口に挿入し、水田から排水路への流出を制限することとした。

なお、こうした積極的な水田貯留によって稲の生育が妨げられることのないように配慮する必要がある。本研究では農水省構造改善局の資料⁶⁾に基づき、湛水被害を防ぐための許容水深として、田植え直後には20cm、収穫期において30cm、湛水の継続は最長24時間を制約条件に設定し、切欠き板の越流幅と天端高を調節することで水田内の水深を許容値内に抑えるようにしている。

3. 水田地域における雨水流出過程の現地観測

実際の水田地域において現地観測区域を設定し、雨水貯留の実態を観測するとともに、上述した強化方策の有効性を検討した。観測地域は図-5 に示すように新川の支川・五条川の右岸に位置し、約 $80,000\text{m}^2$ の面積に30面の水田が存在する。水田群の中央には排水路が流れてお

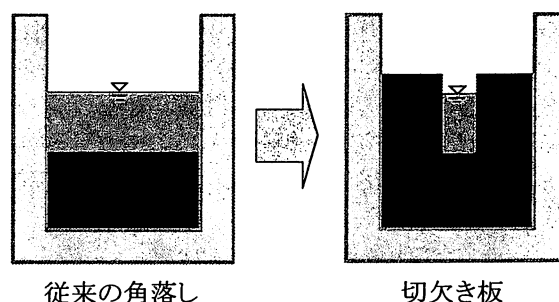


図-4 落水口への切欠き板の挿入

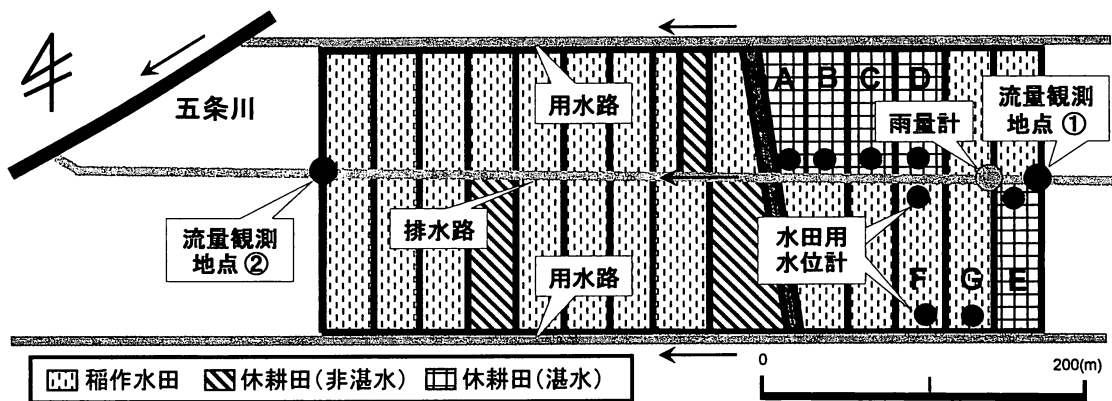


図-5 現地実験の対象地域（愛知県大口町）

り、左右岸の水田からの流出水を集めて五条川へ流入している。排水路の流量観測地点①から②までの距離は450m、水路勾配は1/800である。水田の1面当りの面積は左岸側が約3,000m²、右岸側が約2,300m²、平均すると約2,700m²である。

水田および排水路での計測設備は以下の通りである。まず、前述の雨水貯留機能の強化方策を施した水田と従来のままの水田における水位変化を比較するため、静電容量式水位計（KENEK製、測定精度0.1cm）を取水口と落水口の近傍に設置した。これまでの現地観測の結果、貯留機能強化策によって水田内の雨水貯留量が増え、排水路への流出が抑制されることが確認されている^{4),5)}。

次に、水田群からの流出量を把握するため、排水路の上流地点①と下流地点②に四角堰を設け、流量観測を実施した。堰を越える流れがもぐり越流になる場合もあるため、それぞれ堰の上下流に圧力式水位計（スコープシステム製）を設置した。なお、降水量については、転倒マス雨量計（0.5mm転倒）を排水路脇に設置している。また、測定データはすべての項目を5分間隔で収録した。

4. 水田1面における雨水の貯留・排水過程

水田地域からの流出過程をモデル化するに当たり、個々の水田における雨水貯留・排水過程を調べておく。図-6 は水田1面における水収支の構成要素を示したも

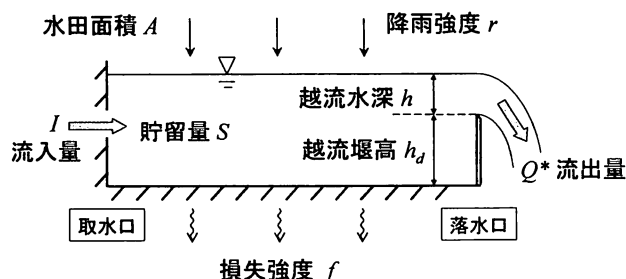


図-6 水田1面における水収支

のである。図のように、面積 A の水田に取水口から流入量 I が流れ込み、降雨強度 r の雨が降るとともに、蒸発散や地下浸透による損失強度 f が失われ、落水口から流出量 Q^* が排水される。こうした水田の水収支を連続式として表わしたものが式(1)である。田面の水位変化は水田全体で一様に生じることから、水田内の貯留量 S は面積 A と水深（落水口の越流堰高 h_d と越流水深 h の和）を乗じることで求められる。さらに、落水口からの排水は角落とし・切欠き板ともに堰による越流の形式をとるので、流出量 Q^* は刃形堰の流量公式(2)によって表わすことができる。式中の C は落水口の流量係数、 B は越流堰の幅である。

$$\frac{dS}{dt} = I + rA - fA - Q^*, \quad S = A(h + h_d) \quad (1)$$

$$Q^* = CBh^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

基礎式(1)(2)を解くに当り、水田面積 A や落水口の堰高 h_d と越流幅 B は既知であるが、流量係数 C と水田の損失強度 f は未知である。そこで、種々の越流水深 h に対して落水口からの流出量 Q^* を実測し、式(2)から流量係数を逆算した結果、角落とし・切欠き板ともに $C=1.90$ 程度であった（ただし、m-s 単位）。

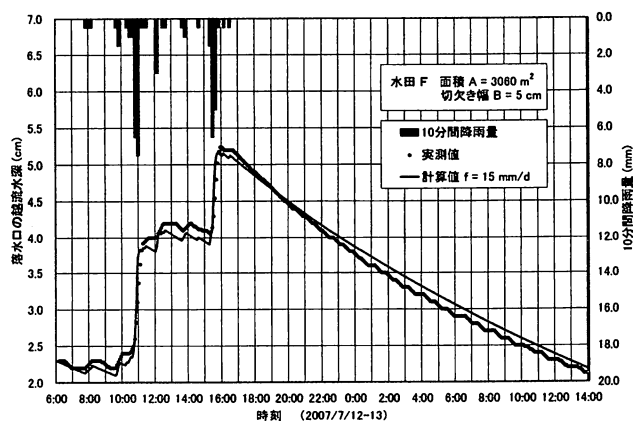


図-7 水田モデル式(1)(2)による水位変動の再現性

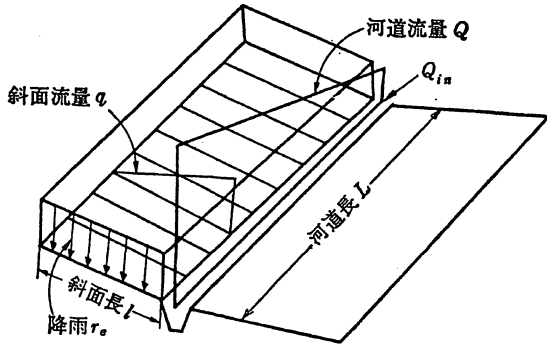


図-8 等価粗度法による小流域のモデル化⁷⁾

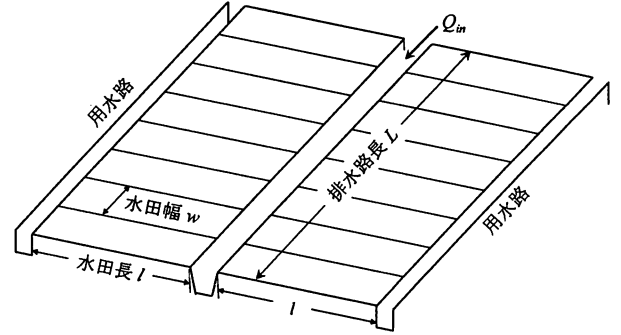


図-9 水田地域からの流出過程のモデル化

水田における損失現象は季節や天候、水田の土質、周辺の地下水位等によって左右され、損失強度 f は5～30 mm/day 以上と変化幅が広い。そこで平均的な値として $f=15\text{mm/day}$ と仮定し、取水口を閉じた $I=0$ の状態について上式を数値解析した。図-7 は解析結果と観測データを比較した一例であり、式(1)(2)が降雨に対する水田の水位変化を精度よく再現できることを示している。

5. 等価粗度法による流出過程のモデル化

水田を活用した雨水貯留による流出抑制策の効果を検討するために、分布定数系モデルによって流域内の流出過程を取り扱う。ここでは、水田を主体とする小流域を対象に、等価粗度法による流出解析モデルを構築する。

(1) 水田1面の等価粗度斜面への変換

等価粗度法では、流域からの流出過程を図-8 のように斜面部の表面流出過程と河道での集水流下過程とに分けてモデル化する⁷⁾。一方、本研究で対象とする水田地域は、図-9 のように1本の排水路の両岸に水田群が広がっている。したがって、水田群を水理的に等価な斜面

部に置き換える必要がある。

等価粗度法において、斜面上の単位幅当りの流れは次式で表わされる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f \quad (3)$$

$$q = \alpha h^m \quad (4)$$

ここに、 h は斜面流の水深、 q は斜面流量、 t は時間、 x は斜面の流下方向の座標、 r と f は単位面積当りの降雨強度および損失強度、 α 、 m は流れに関する定数である。

いま、斜面上の流れを図-10のように流下距離 l と斜面幅 w 、すなわち面積 $A = wl$ について積分すると、式(3)は式(1)と同等の形になる。また、水田からの排水量と斜面末端からの流出量の同等性から次式が成立する。

$$Q^* = CBh^{\frac{3}{2}} = wq = w\alpha h^m \quad (5)$$

$$\therefore \alpha = \frac{CB}{w} = \frac{CB}{A}l, \quad m = \frac{3}{2} \quad (6)$$

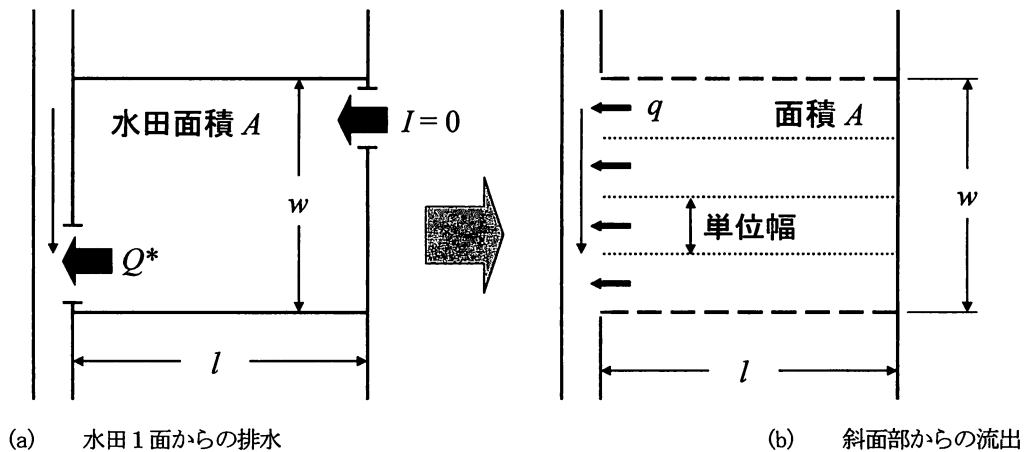


図-10 水田1面からの排水と斜面上の流出との対応

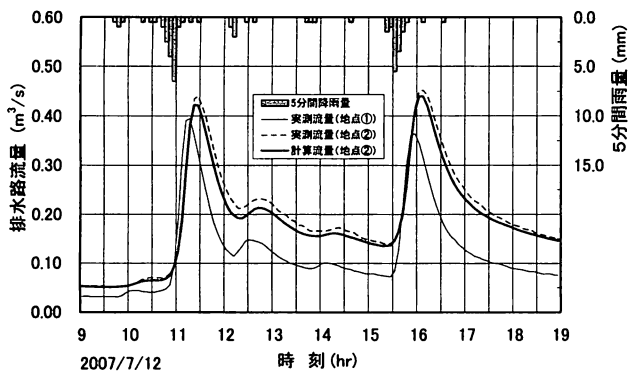


図-11 流量観測値による等価粗度モデルの同定

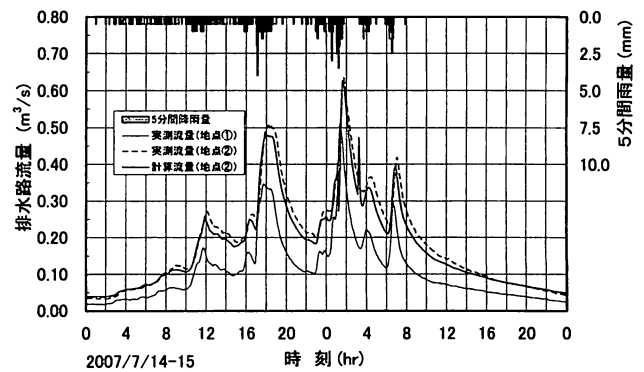


図-12 同定された等価粗度モデルの再現性の検証

すなわち、式(4)のパラメータ α と m を式(6)のように与えることによって、水田群からの流出を式(3)(4)を用いて解くことが可能となる。

(2) 農業排水路の流下過程のモデル化

水田群からの排水を集め流下させる排水路の流れは、Manning則に基づく次式で与えられる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (7)$$

$$Q = \beta H^M, \quad \beta = \frac{b\sqrt{I}}{n}, \quad M = \frac{5}{3} \quad (8)$$

ここに、 H は排水路の水深、 Q は排水路流量、 t は時間、 x は排水路の流下方向座標である。 q は水田群からの単位長さ当りの流出量で、斜面部の解析式(4)によって求められる。定数 b と n 、 I は、それぞれ排水路の幅と粗度係数、水路勾配である。

6. 現地観測地域への流出解析モデルの適用

上述した流出解析モデルを今回の観測地域に適用し、モデルパラメータを同定するとともに、降雨に対する水田群からの流出量の再現性を確認する。

(1) 観測データに基づくモデルパラメータの同定

水田1面からの流出に関するパラメータ α 、 m は式(6)で与えられたが、現地には落水口の越流幅 B が異なる水田も存在するため、水田群全体を扱う上では代表値を観測値から改めて同定する必要がある。また、排水路の流量に係わるパラメータのうち、粗度係数 n については観測結果から決定する必要がある。

図-11は、現地観測地域において2007年7月12～13日の降雨に対して求めた排水路の流量変化である。解析では、

前述の基礎方程式を差分化⁸⁾し、図中に併記した上流地点①での実測流量を境界条件として下流地点②の流量を数値計算した。計算の時間刻みは $\Delta t = 5\text{min}$ 、河道部の空間刻みは $\Delta x = 2.5\text{m}$ 、斜面部では $\Delta x = l = 90\text{m}$ と設定した。パラメータについては、水田面積を平均値である $A = 2,700\text{m}^2$ 、既知の値である $C = 1.90$ 、 $w = 30\text{m}$ 、 $m = 3/2$ 、 $b = 1.0\text{m}$ 、 $L = 450\text{m}$ 、 $I = 1/800$ 、 $M = 5/3$ を与えた。他の定数については、計算値と観測値との比較から $B = 30\text{cm}$ 、 $n = 0.04$ と同定された。図-11を見ると、下流地点②の流量は、解析結果と観測値ともによく対応しており、モデルの再現性は良好といえる。

(2) 同定されたモデルの検証

上述のように同定されたモデルの有効性を検証するために、別の降雨に対する排水路流量の再現性を調べた。図-12は、2007年7月14～15日の降雨に対して求めた下流地点②の流量変化である。図から明らかなように、解析結果は観測値を精度良く再現しており、本研究で採用した等価粗度モデルが十分な有効性をもつことが分かる。

7. 計画降雨に対する水田貯留の流出抑制効果

前章で構築した水田地域の流出解析モデルをもとに、落水口に切欠き板を挿入することによる水田の流出抑制効果の違いを評価し、方策の有効性を検討する。対象降雨としては、都市近郊の中小河川の総合治水計画で想定される中央集中型1/10 確率降雨を採り上げる。

図-13は、今回の観測地域と同様に、平均面積 $2,700\text{m}^2$ の水田が排水路の両側に各15面存在する小流域を対象として、落水口の越流幅 B を 30cm 、 20cm 、 10cm 、 5cm と変えた場合の流域末端流量の解析結果を示している。なお、損失強度 f については一般的な値を設定しにくいため、ここでは 0mm/day と仮定した。この図から、落水口の越流幅を狭めることによって各水田からの流出量が低減し、流域末端における流出量のピーク値を大きく減少させることが可能なことが分かる。

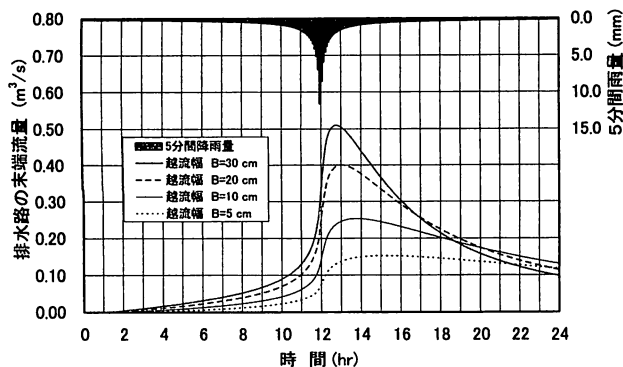


図-13 1/10 確率降雨に対する流出量の時間変化

図-13から流域末端流出量のピーク値とその生起時刻を読み取り、落水口の越流幅との関係で表したものが図-14である。この図によると、 $B = 30\text{cm}$ の場合に対して $B = 20\text{cm}$ ではピーク流出量は 78% に、 $B = 10\text{cm}$ では 50% に、 $B = 5\text{cm}$ では 30% に急減している。すなわち、切欠き板の越流幅を小さく設定することによって、ピーク流出量を 1/3 程度にまで抑制できることになる。このように落水口からの流出量を抑制すると、水田内の貯留水深が増大するが、その上昇量は筆者らの研究⁵⁾によると最大でも十数 cm であり、また上昇期間も半日程度であるから、稲作など農業への影響は事実上ないものと考えられる。

また、降雨開始時からのピーク生起時刻についても、 $B = 30\text{cm}$ の場合に対して $B = 20\text{cm}$ では 15min、 $B = 10\text{cm}$ では 60min、 $B = 5\text{cm}$ では 150min つまり 2.5 時間も遅らせることができています。このことより、落水口への切欠き板の挿入が下流域への洪水集中を回避するうえで大きな効果をもたらすものと考えられる。

8. まとめ

本研究では、水田での雨水貯留による流出抑制効果とその強化策を検討することを目的として、実際の水田を用いて現地観測を実施するとともに、水田地域全体に対する流出解析によって流出抑制策の有効性を評価した。得られた成果と今後の課題は以下の通りである。

水田の雨水貯留機能を高める方策として、水田の取水口に自動給水栓を、落水口に切欠き板を設けることによって排水路への流出を抑制する手法を提案し、水田 1 面における雨水の貯留・排水過程を表わす水収支モデルの有効性を実測値との比較により確認した。

つぎに、水田 30 面からなる小流域を対象として等価粗度法による流出解析モデルを構築し、水田群の流出抑制効果を解析した。中央集中型の計画降雨に対する解析結果によると、落水口越流部の切欠き幅を狭めることにより、流域末端でのピーク流出量を低減させ、流出時間

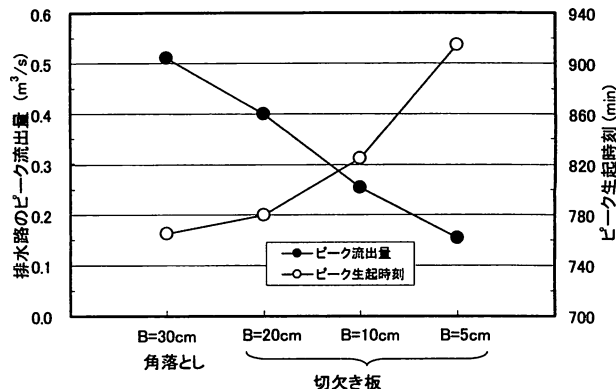


図-14 流出量のピーク値に及ぼす越流幅の効果

も遅らせることが可能となることが明らかとなった。

本研究により、水田 1 面での雨水貯留機能ならびに水田群としての流出抑制効果について一定の知見が得られた。今後は、河川流域全体における水田貯留の有効性について検討する予定である。また、実際の水田にはさまざまな形態があり、本研究で扱った状況とは異なった地域も存在する。流域の実情に合わせ、より広範な状況に対応できるように改良を進めることも必要である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、多大な協力と助言を賜った大口町役場建設環境部と(有)服部農園 服部靖宏氏に謝意を表します。最後に、本研究は平成18・19年度科学研究費補助金（基盤研究(C)18560504 研究代表者：原田守博）の助成を得て実施されたことを付記する。

参考文献

- 1) 例えば、虫明巧臣・石崎勝義・吉野文雄・山口高志編：水環境の保全と再生，山海堂，pp.149～150，1987。
- 2) 新川流域総合治水対策協議会：新川流域の流域対策の進捗状況(平成19年5月)，2007。
- 3) 志村博康：水田・畑の治水機能評価，農業土木学会誌，Vol.50, No.1, pp.25～29，1982。
- 4) 藤澤 悟・原田守博・森 富雄・大森美喜夫：水田貯留による雨水の流出抑制効果に関する現地実験，土木学会 第60回年次講演会概要集，II-059, pp.117-118，2005。
- 5) 原田守博・大森美喜夫・森 富雄・藤澤 悟：水田貯留による雨水の流出抑制効果とその強化方策に関する現地実験，水工学論文集，Vol.52, pp.469-474，2008。
- 6) 農林省構造改善局：土地改良事業計画設計基準 一計画・排水一，p.29，1978。
- 7) 例えば、岩佐義朗：最新河川工学，森北出版，pp.47-49，1979。
- 8) Philip B. Bedient and Wayne C. Huber：Hydrology and Floodplain Analysis, Third ed., Prentice Hall, pp.138-140, 274-290，2002。

(2008. 4. 3 受付)