

未圃場整備地区における 「田んぼダム」の洪水緩和機能の評価

EVALUATION OF FLOOD MITIGATION EFFECT OF A PADDY FIELD DAM IN AN UNIMPROVED PADDY FIELD AREA

吉川夏樹¹・宮津進²・小出英幸³・三沢眞一⁴・安田浩保⁵

Natsuki YOSHIKAWA, Susumu MIYAZU, Hideyuki KOIDE, Shinichi MISAWA and Hiroyasu YASUDA

¹正会員 博（農） 新潟大学助教 災害復興科学センター（〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050）

²学生員 新潟大学大学院 自然科学研究科（〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050）

³非会員 新潟大学大学院 自然科学研究科（〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050）

⁴非会員 博（農） 新潟大学教授 農学部（〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050）

⁵正会員 博（工） 新潟大学准教授 災害復興科学センター（〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050）

The Paddy Field Dam, a flood mitigation measure taking advantage of the ponding function of paddy fields, has been introduced as a complementary function to the existing drainage facilities to countermeasure a recent increase in the frequency and magnitude of heavy rainfall events. The core facility of the Paddy Field Dam is the runoff control device, which shrinks the drain orifice and restricts the volume of surface water runoff from a paddy field plot. Although this technology was originally developed for modernized paddy fields equipped with concrete-made drainage boxes, authors contrived the runoff control device to be applicable to unimproved paddy fields without drainage boxes being equipped. The purpose of this study is to quantitatively evaluate the flood mitigation performance of the paddy fields installed with the newly developed device in an unimproved paddy field area. The evaluation was conducted by an integrated simulation model. The result of the simulation shows that the Paddy Field Dam in the study area would have the effect reducing the inundation damage due to 30-year return period rainfall event to almost that due to 10-year return period rainfall event.

Key Words : *Paddy Field Dam, Unimproved paddy field, Runoff control cap, Flood Mitigation*

1. はじめに

農業用排水路および付随する排水施設の整備規模は、既往の降雨に基づく排水計画に則って設計されてきた。しかし、近年の局地的短時間集中豪雨の発生頻度の増加に加え、都市近郊農業地域においては都市化・宅地化の進展により、溢水による浸水被害が増加している。排水路改修や排水施設の増強等の対応策も提案されているが、抜本的な対応は財政的・技術的に困難である。

こうしたなか、既存施設の機能補完対策として、新潟県では「田んぼダム」の取組が行われている。田んぼダムとは、水田耕区の排水孔の孔径を縮小し、降雨ピーク時の落水量を抑制することによって、水田地帯からの流出波形を平滑化するものである。これまでも、水田は洪水緩和機能をもつことが知られている¹⁾²⁾が、田んぼダムはこれを人為的に高める点に基本的特徴がある。田んぼダムは、豪雨時の浸水被害の緩和策の一つとして、新

潟県村上地域振興局の担当者らによって2002年に発案され、吉川ら³⁾⁴⁾⁵⁾によって技術的検証が行われている。新潟県内において既に約8,000haの水田に導入されており、現在もなお各地で導入が検討されている。

これまでに筆者らが取り組んできた田んぼダムは、圃場整備によって排水改良を目的に設置される排水マスを利用して落水量を調整する技術で、適用は整備済み水田（以下、整備水田）に限られていた。しかし、全国の整備水田の割合は6割程度（2006年現在）⁶⁾であり、本研究の対象地である新潟市においては42%（同上）にとどまる。田んぼダムの効果発現には取組の面的な広がりが重要であるため、従来の整備水田に加えて未圃場整備水田（以下、未整備水田）への適用が不可欠である。両者に対してこの技術が適用されることで、はじめて田んぼダムが有する能力が最大限に発揮され、地区全体の治水安全度の向上に寄与できるようになる。

このような実状を踏まえて、筆者らは排水マスのない未整備水田向けの落水量調整装置を考案した。本研究で

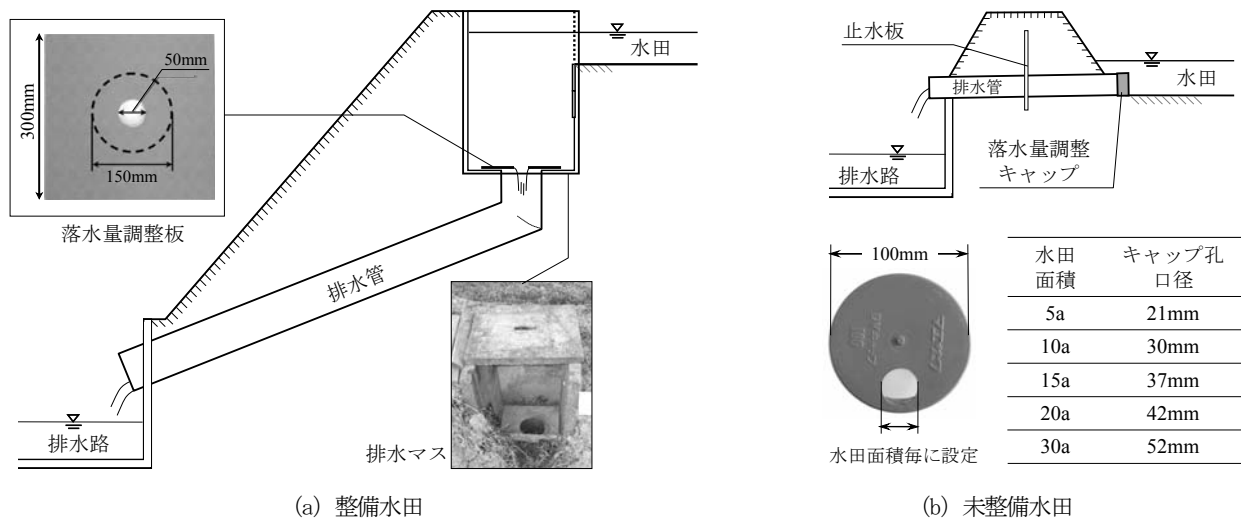


図-1 田んぼダムの落水量調整方法

は、まず、考案した装置の流出特性を室内実験、現地試験によって把握した。この結果を用いて、全水田が未整備である新潟県新潟市横江幹線排水路流域（以下、横江地区）を対象に、シミュレーションによって浸水被害軽減効果を定量的に示し、その有効性を検討した。

2. 田んぼダムの概要

(1) 従来の整備水田における落水量調整方法

整備水田における田んぼダムの中核施設は、「落水量調整板」と呼ばれる板であり、排水マス底面の排水孔（直径150mm）の上に設置する。落水量調整板は、合板を長方形底面に合わせて加工し、中心に直径50mm程度の孔を開けたものである（図-1(a)）。

落水量調整板を設置すると、孔の大きさが制限要因となり、大雨時に自動的に流出量が抑制され、雨水は一時的に水田内に貯留される。

(2) 考案した未整備水田用の落水量調整方法

一般的に、未整備水田の田面水の排水は、畦畔に埋設された水田と排水路を繋ぐ塩ビ管を通して行われることが多く、整備水田に見られるような排水マスは設置されていない。

こうした排水方式に対応した落水量調整装置として、水田側塩ビ管開口部に流出孔を開けた塩ビキャップ（以下、調整キャップ）を装着する方法を考案した（図-1(b)）。流出孔の孔径は、後述の水田流出量算定モデルを用いて、ごみ詰まりによる閉塞が起こりにくいこと、30年確率の後方集中型降雨イベント発生時に水田耕区内の湛水深が畦畔を越えないことを条件に、水田面積毎に設定した。

(3) 研究対象地区

横江地区の1,531ha を解析の対象とした（図-2）。対象

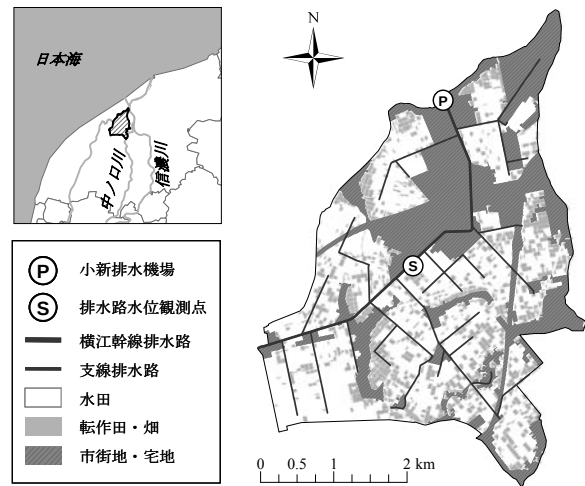


図-2 研究対象地

地区は、信濃川とその支流である中ノ口川の西側に位置し、大部分が標高0メートル以下の低平地帯である。主な土地利用は、水田40%、市街地・集落36%、畑地・転作田19%である。水田については、これまで圃場整備の履歴がなく、田面水の排水には口径100mmの塩ビ管が既設されている。

この地区の排水は、中央部を流れる横江幹線排水路に流入し、末端の小新排水機場（最大排水能力 21m³/s）から西川へ常時機械排水されている。そのため、排水機の排水能力を上回る降雨イベントでは、排水路水位が上昇し、溢水による浸水被害が生じる。小規模浸水被害は高い頻度で発生しているうえ、1998年8月4日の豪雨（日降水量190mm、時間最大降水量44mm）では、対象地区の広範囲で市街地・転作田に大きな被害を与えた。

対象地区では、転作田を利用して全国的に有名な「黒埼茶豆」の生産が行われている。茶豆は湛水に弱く、一度の湛水で商品価値の大幅な下落に繋がる。市街地の浸水被害のほか、転作田作物への被害の軽減が強く求められている。

3. 田んぼダムの評価モデル

田んぼダムを地区内の全水田で実施した場合と実施しない場合を比較し、浸水被害の軽減効果を定量的に評価することを目的に、数値解析モデルを構築した。モデルは、(1)水田からの流出量を計算する水田流出量算定モデル、(2)市街地(宅地)・転作田(畑地)からの流出量を計算するKinematic Wave モデル、(3)河川・排水路の水位・流量を計算する1次元不定流モデル、(4)氾濫後の浸水過程を表現する平面2次元不定流モデルの4者を結合したものである。(1)、(2)の出力結果を(3)の、(3)で計算する溢水流量を(4)の横流入量とした(図-3)。

(1) 水田流出量算定モデル

水田区画からの流出は、高湛水位では流出孔が完全に水面下となり、オリフィスとして扱えるが、低湛水位では孔の一部が水面上に露出し、セキ状態になる。セキとオリフィスの移行部の流出量は、田面水位がオリフィス上縁と一致した場合と考えられるため、オリフィスおよびセキの公式の導出過程に着目し、ある田面水位が与えられた時の二つの状態の流出量を以下の式で連続的に計算した(図-4)。

$$q_p = C \int b \sqrt{2g(H-y)} dy \quad (1)$$

$$b = 2r \sin \theta$$

$$y = r - r \cos \theta$$

$$dy = r \sin \theta d\theta$$

ここに、 q_p ：田面水の流出量、 C ：流量係数である。

ただし、積分範囲は、 $H > H^*$ では、 $[0, H^*]$ 、 $H \leq H^*$ では、 $[0, H]$ である。上式は、解析的に解くことが困難であるため、数値積分法(Simpson法)によって計算した。

田面水位は次式によって表すことができる。

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{q_p}{A} + R - L \quad (2)$$

ここに、 t ：時間、 A ：水田面積、 R ：降雨量、 L ：減水深である。

田面水の流出量(q_p)を与え、田面水位(H)について、Runge-Kutta法で逐次計算した。

(2) 市街地・転作田からの流出量算定モデル

転作田(畑)・市街地(集落)からの流出は、以下のKinematic Wave モデルを用いた。

$$q_k = \alpha h_k^m \quad (3)$$

$$\frac{\partial h_k}{\partial t} + \frac{\partial q_k}{\partial x_k} = r_e \quad (4)$$

ここに、 h_k ：水深、 q_k ：斜面単位幅当たりの流量、 t ：時間、 x_k ：斜面上流端からの距離、 r_e ：有効降水量、 α, m ：斜面流定数である。有効雨量は実測降水量と流出

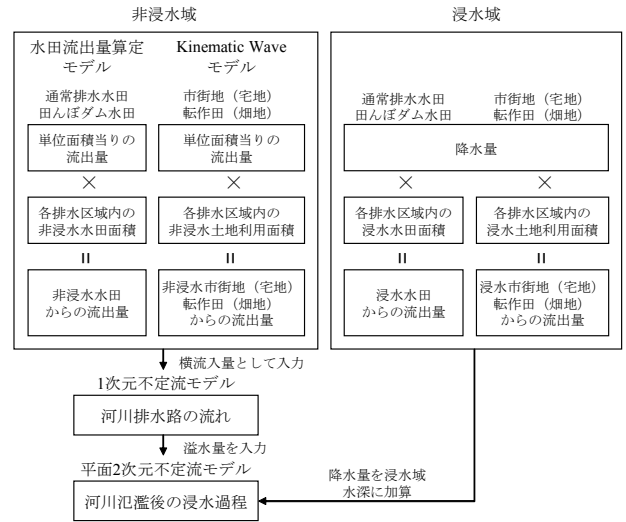


図-3 シミュレーションモデルの概要

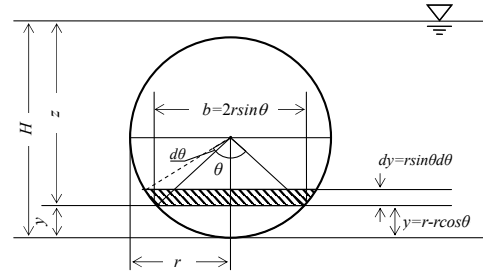


図-4 流出孔の水利緒元

量から作成した損失雨量式を用いて算出した。

(3) 河川・排水路の水位・流量の算定モデル

河川・排水路の流れの計算には、以下の1次元不定流モデルを用いた。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2g} \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + S + \frac{n^2 v |v|}{R^{3/4}} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{LAT} \quad (6)$$

ここに、 v ：流速、 t ：時間、 h ：水深、 x ：距離、 S ：水路底勾配、 g ：重力加速度、 n ：粗度係数、 R ：径深、 Q ：流量、 A ：流積、 q_{LAT} ：横流入量である。

横流入量(q_{LAT})は、各排水路メッシュ対応する排水流入区域内の各土地利用面積に、水田流出量算定モデル、Kinematic Wave モデルで算出した各土地利用からの単位面積あたりの流出量を乗じて求めた。ただし、水田および他の土地利用が浸水域内にある場合、流出は抑制されるため、浸水域内に該当する2次元メッシュからの流出量を0とした上で、(4)の各該当メッシュの浸水深に降水高を加算した。

また、各排水路メッシュからの溢水流量(q_{OF})は、複断面水路の最上段に水路幅と同じ幅を持つ仮想の矩形断面を設定し、水路高を越える水深(h_{OF})を求め、矩形断面部の水路幅(B)と流速(v)を乗じて求めた。

$$q_{OF} = h_{OF} \cdot B \cdot v \quad (7)$$

水路網は、西蒲原土地改良区黒埼支所から提供された排水路系統図、計画断面図および現地調査をもとに作成し、メッシュ延長400m、総メッシュ数94で表現した。

(4) 浸水過程の算定モデル

氾濫後の浸水過程の計算は、以下の平面2次元不定流モデルを用いた。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q_{OF} \quad (10)$$

ここに、 u, v : x, y 方向の流速、 M, N : x, y 方向の流量フラックス、 g : 重力加速度、 n : 粗度係数、 h : 水深、 H : 水位、 q_{OF} : 排水路からの溢水量である。

対象流域を $\Delta x = \Delta y = 25\text{m}$ の2次元メッシュに分割し、国土交通省北陸地域整備局提供のレーザープロファイラデータを用いて、格子内の地盤標高平均値を与えた。粗度係数(n)は、農地: 0.025, 市街地: 0.040とした。

3. 評価モデルの検証とキャリブレーション

(1) 室内実験による調整キャップの水利特性の検討

a) 室内実験

調整キャップからの流出特性を把握するため、新潟大学水理実験棟において室内実験を行った。循環ポンプ付き水路および沈砂池(水面積 21.2m^2)を土嚢でせき止め、水田に見立てて使用した。現地で用いられている排水管($\phi 100\text{mm}$)に調整キャップを設置して、貯水池に排水し、水位の低下から流出量を観測した。

b) 室内実験とモデルによる計算結果の比較

図-5に、30mmの調整キャップを装着した場合の実験装置の水深変化の実測値とモデルによる計算値を示す。試行錯誤同定法によって流量係数(C)を求めた結果、どの孔径においても0.62で、計算値が実測値を高精度で再現した。

(2) 試験区における水田からの流出

a) 現地試験区における観測

考案した調整キャップの流出量抑制効果を現地で実測することを目的に、対象地区に試験区15.5haを設定した。「田んぼダム実施試験区」(7.8ha)と「通常排水試験区」(7.7ha)に分割し、両試験区の最下流部に2台1組の水位センサーをそれぞれ設置して、観測した水面勾配から流出量を算出した。

b) モデルによる計算結果との比較

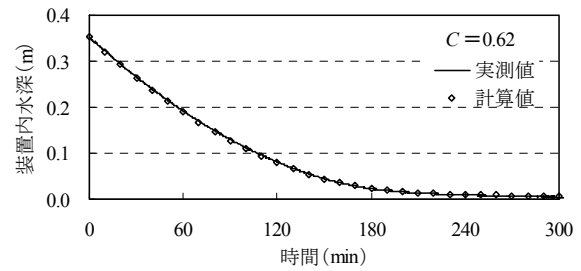


図-5 実験装置の水深低下の実測値とモデルによる計算値
流出孔孔径30mmの例

観測期間中最大であった2009年7月9日の降雨イベント(24時間降水量: 92mm, 最大時間降水量: 9mm)を用いて、田んぼダム実施試験区および通常排水試験区からの実測流出量を計算した。実測値とモデルによる計算値を比較した結果を図-6に示す。

田んぼダム実施試験区の流出量実測値は、ピーク流出付近で計算値を大きく上回った(図-6(a))。調整キャップからの流出量計算の再現性は現地観測、室内実験で確認されているため、この乖離の原因は畦畔からの漏水であると推察できる。実際に現地調査では、モグラ穴等による畦畔からの漏水を多数の箇所を確認した。

畦畔からの漏水は、水田区画毎に差異があり、漏水箇所を特定できないため、試験区における漏水特性を対象地区の代表と考えた上で、漏水量(LH)と田面水位(H)の関係を以下の式で表現した。

$$LH = a_p \cdot H^{b_p} \quad (11)$$

ここに、 a_p, b_p は実測に基づき決定したパラメータであるが、 $a_p > 0$ で漏水量が田面水位の b_p 乗に比例して大きくなることを示している。漏水量を考慮して実測流出量との適合を試みた結果、計算結果は実測値を概ね再現した。

通常排水試験区においては、田面水位の上昇が田んぼダム実施試験区と比較して小さいため、漏水量は小さいものの、漏水量を考慮したモデルの適用により、再現性が高まった(図-6(b))。

対象地区の水田は、他の未整備水田地区同様、漏水量が大きく、田んぼダム実施試験区では、ピーク流出量の40%、通常排水水田では14%が漏水であることが明らかになった。

(3) 幹線排水路水位と排水機場吐出量の再現性

2009年7月9日の降雨を対象に、横江幹線排水路中流に設置した水位センサー(図-2)の水位実測値および小新排水機場の吐出量実績を計算結果と比較して、モデルの再現性を検証した(図-7)。計算では、低水位で排水機の運転が不安定になるため、水位への影響が見られるものの、高水位では概ね再現できた。

(4) 浸水現象の再現性

1998年8月4日に発生した洪水被害(日降水量190mm,

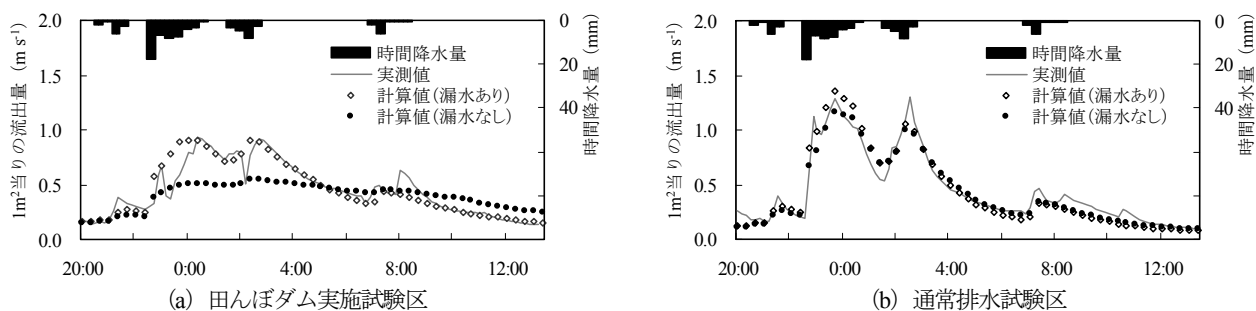


図-6 水田圃区からの流出量の実測値と計算値

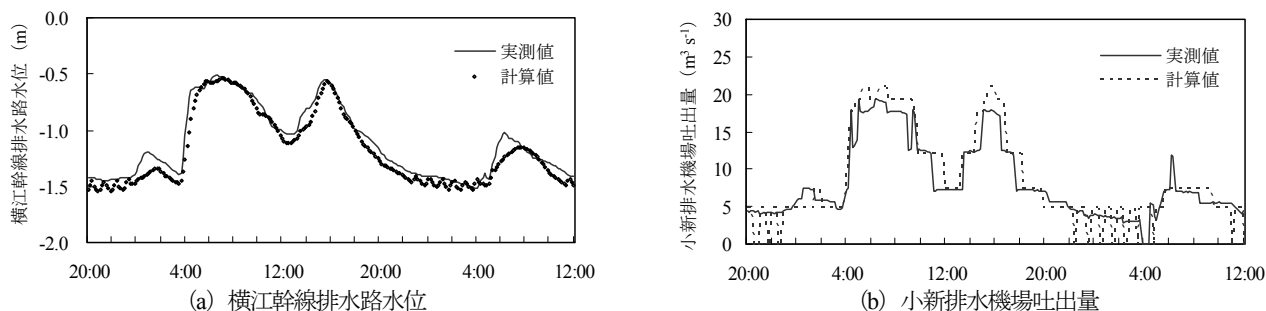


図-7 幹線排水路水位および排水機場吐出量の実測値と計算値

時間最大降水量44mm)を対象に、構築したモデルに基づく浸水域の再現計算を行った。

図-8に、再現計算による最大浸水域(午前11時)と旧黒埼町職員による浸水実績調査結果とを比較した結果を示す。調査における浸水深の判断は目視によって行われており、主要作物である枝豆が水没する概ね30cmを基準とし、それ未満を湛水、それ以上を冠水としている。なお、調査は農地を対象に行われたため、冠水・湛水域の比較は農地に限定した。

計算による湛水範囲は、概ね調査による冠水・湛水範囲を再現した。

4. 田んぼダムの効果算定

(1) 計算条件

再現期間10年(日降水量133mm, 時間最大降水量36mm)および30年(日降水量163mm, 時間最大降水量44mm)の後方集中型降雨波形(ピーク位置0.8)の24時間降水量を適用し、田んぼダムの浸水被害軽減効果を評価した。対象地区水田における田んぼダムの取組が(1)実施率 0%, (2)実施率 100%, (3)実施率 100%かつ漏水対策を講じる場合の3つのシナリオを想定した。

(2) 計算結果

各ケースの最大浸水域を図-9に、浸水面積を表-1に示す。再現期間30年の降雨イベントでは、浸水深0.1m以上の浸水面積はシナリオ(1), (2), (3)で、それぞれ215ha, 168ha, 145haとなった。シナリオ(1)と比較して、(2)では22%, (3)では33%浸水面積が減少した。

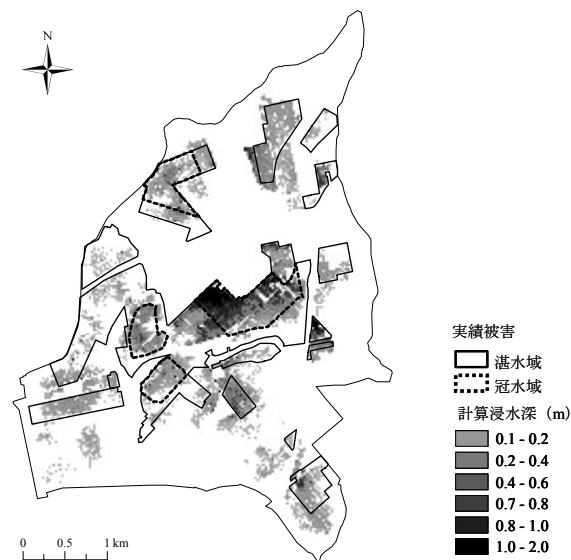


図-8 1998年8月4日の農地の浸水実績と再現計算結果の比較

表-2に、とりわけ浸水被害の軽減が求められる転作田(畑地)および市街地(宅地)への田んぼダムの浸水軽減効果を示した。なお、転作田(畑地)については、前述の基準に基づき、浸水深30cm未満を湛水、30cm以上を冠水とし、市街地(宅地)は、火災保険等の基準に倣って、浸水深45cm未満を床下浸水、45cm以上を床上浸水とした。

転作田の湛水・冠水面積の軽減率は、シナリオ(2)では、それぞれ 20%, 15%, シナリオ(3)では、33%, 31%となった。同様に、市街地床下浸水、床上浸水面積の軽減率は、シナリオ(2)では、それぞれ 14%, 31%, シナリオ(3)では、19%, 42%となった。

シナリオ(3)の浸水被害は、概ね田んぼダムを実施し



シナリオ(1) 田んぼダム不実施



シナリオ(3) 漏水対策を講じた上で田んぼダム実施

図-9 浸水シミュレーション結果： 田んぼダムの導入により、浸水面積は33%減少する。これは、与えられた30年確率降雨イベントに対し、概ね10年確率の被害に軽減されたことを意味する。

表-1 地区全体における浸水面積と減少率

再現 期間	浸水面積 (ha)			減少率	
	実施率 0%	実施率 100%	実施率 100% 漏水対策	実施率 100%	実施率 100% 漏水対策
10年	137	100	88	27%	36%
30年	215	168	144	22%	33%

表-2 転作田と市街地の浸水面積と減少率
転作田 (畑)

再現 期間		浸水面積 (ha)			減少率	
		実施率 0%	実施率 100%	実施率 100% 漏水対策	実施率 100%	実施率 100% 漏水対策
10年	浸水	15.3	11.7	10.4	23%	32%
	冠水	3.6	2.3	1.1	35%	69%
30年	浸水	24.6	19.8	16.4	20%	33%
	冠水	5.8	5.0	4.0	15%	31%

市街地 (宅地)

再現 期間		浸水面積 (ha)			減少率	
		実施率 0%	実施率 100%	実施率 100% 漏水対策	実施率 100%	実施率 100% 漏水対策
10年	床下 浸水	22.9	18.3	16.5	20%	28%
	床上冠水	5.6	3.4	2.8	38%	50%
30年	床下 浸水	30.5	26.4	24.6	14%	19%
	床上冠水	10.1	7.0	5.8	31%	42%

ない場合の10年確率の被害に相当する。

5. まとめ

未整備水田地区へ田んぼダムを導入するための落水量調整技術を開発し、その洪水抑制効果を定量的に評価した。その結果、筆者らの考案した調整キャップを装着す

ることにより、低平未整備地区においても田んぼダムの効果が発揮されることが明らかになった。ただし、本研究対象地区に見られるような漏水量が大きい水田においては、田んぼダムの導入と合わせて畦畔の補強等の漏水対策への重点的投資が、田んぼダムの効果を最大限に引き出す上で重要であるといえる。

謝辞：新潟市農村整備課、西蒲原土地改良区には多大な助言・協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。本研究は文部科学省科学研究費補助金・課題21380143「田んぼダム」による洪水緩和機能発揮のための技術開発に関する研究での研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 志村博康：水田・畑の治水機能評価—国土に必要な治水容量の農地・ダム・森林による分担—，農業土木学会誌，50 (1)，pp25-29，1982.
- 2) Masumoto, T., Yoshida, T., Kubota, T.: An index for evaluating the flood prevention function of paddies. Paddy and Water Environment 4 (4), pp205-210, 2006.
- 3) 吉川夏樹，長尾直樹，三沢眞一：水田耕区における落水量調整板のピーク流出抑制機能の評価，農業農村工学会論文集，261，pp 31-39，2009.
- 4) 吉川夏樹，長尾直樹，三沢眞一：田んぼダム実施流域における洪水緩和機能の評価，農業農村工学会論文集，261，pp 41-48，2009.
- 5) Yoshikawa, N., Nagao, N., Misawa, S.: Evaluation of the flood mitigation effect of a Paddy Field Dam project, Agricultural Water Management, 97(2), pp259-270, 2010.
- 6) 農林水産省農村整備局：平成18年度 農業基盤整備基礎調査，2006.

(2010. 4. 8受付)