

平成 28 年熊本地震により亀裂や不陸が生じた水田圃場の減水深の特徴

丸山篤志・伊川浩樹

(2018 年 5 月 16 日 受理)

要 旨

丸山篤志・伊川浩樹：平成 28 年熊本地震により亀裂や不陸が生じた水田圃場の減水深の特徴。九州沖縄農研研究資料 95：10-17, 2019.

平成 28 年熊本地震により亀裂や不陸（凹凸）が生じた水田圃場において、漏水の指標となる減水深の調査を行った。被害が生じた熊本市東区（秋津）、嘉島町（上六嘉）、阿蘇市（黒川）の水田において減水深を測定し、不陸や亀裂の有無など、地表の外観状況による減水深の違いを評価した。不陸が生じた水田を含む秋津の 3 圃場で計測された減水深は 25～31mm/day の範囲であった。これらの値は、土地改良事業計画設計基準における減水深の目標値である 15～25mm/day をやや上回っていた。亀裂が生じた上六嘉の水田の減水深は 38mm/day であった。ただし、代かきが実施されていないため、代かき後の減水深は上記の目標値の範囲内になるものと考えられた。黒川の水田は減水深が極端に大きく、少なく見積もった場合でも 260mm/day に達した。この減水深から算出された水稻栽培期間中の一日あたりの圃場用水量は、6～9 月の全ての月で代かき期のピーク用水量の一般的な値（80～120mm/day）を大きく上回っていた。同水田では、地表には特に外観被害が見られなかったことから、地表面下における土壌の物理構造が地震の影響を受けて変化したことが示唆された。

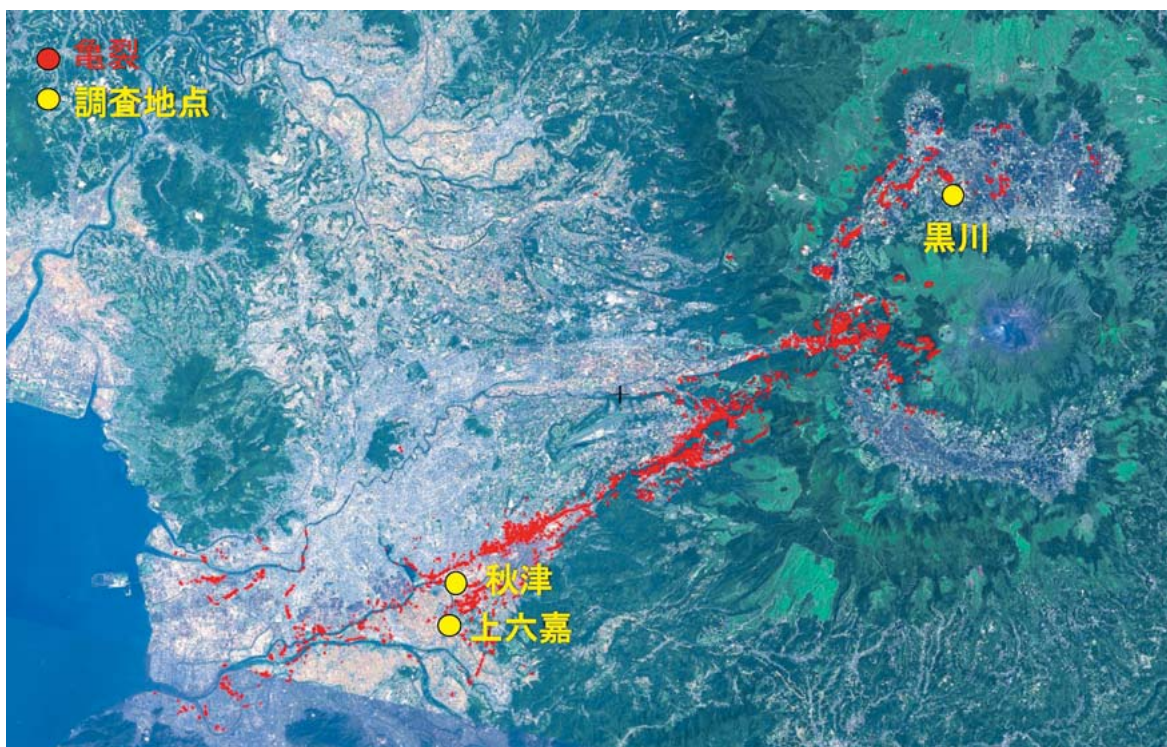
キーワード：減水深，亀裂，蒸発散，水田，不陸，平成 28 年熊本地震，灌漑

I. 緒 言

2016 年 4 月 14 日夜および 4 月 16 日未明に熊本地方を震源とする最大震度 7 の地震が発生し、熊本県から大分県にかけての広範囲で農業施設の倒壊や損壊、農地においても液状化や亀裂の発生など夥しい被害が生じた。地震による亀裂等は土壌の物理的構造を変化させることで、圃場の透水性にも影響を与えることが考えられる。本研究では、平成 28 年熊本地震（以下、熊本地震と略す）により被害が生じたいくつかの圃場において、漏水の指標となる減水深の調査を行い、断層からの距離、地表面の亀裂や激しい凹凸（不陸）の有無など、地表の外観状況によるその違いを明らかにすることを目的とした。また、得られた減水深から栽培期間中に必要とされ

る用水量を算定することで、被災地域における本格的な営農の復興に寄与することを目的とした。ここでは、その調査結果と被害の実態を報告する。

本研究は農林水産省の平成 28 年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業の緊急対応研究課題として実施されました。被災圃場での調査を行うにあたり、九州沖縄農業研究センターの脇山恭行氏、熊本県農業研究センターの榮誠三郎氏、田中誠司氏、熊本市農業協同組合秋津カントリーの生産者の皆様、熊本県嘉島町の小林努氏、小林健史氏、および熊本県阿蘇市の高崎克也氏には暖かいご支援を頂きました。また、原稿をまとめるにあたり、九州沖縄農業研究センターの中野恵子氏には転換畑の減水深について多くのアドバイスを頂きました。これら関係者の皆様に深く感謝いたします。



第1図 熊本地震後における亀裂の分布と減水深の調査地点¹⁾

1) 国土地理院の電子地形図（標準地図・空中写真・布田川断層帯周辺の地表の亀裂分布図）に調査地点を追記して掲載。

第1表 調査地点の概要

調査地点	調査圃場数	土壌分類 ^{a)}	備考
秋津（転換畑）	8	細粒質普通低地水田土	断層からの距離が異なる圃場で調査
秋津（水田）	3	細粒質普通低地水田土	1圃場は不陸あり、2圃場は対照用
上六嘉（水田）	1	細粒質グライ化灰色低地土	亀裂の発生した圃場
黒川（水田）	1	典型下層低地多湿黒ボク土	外観被害はないが漏水が生じた圃場

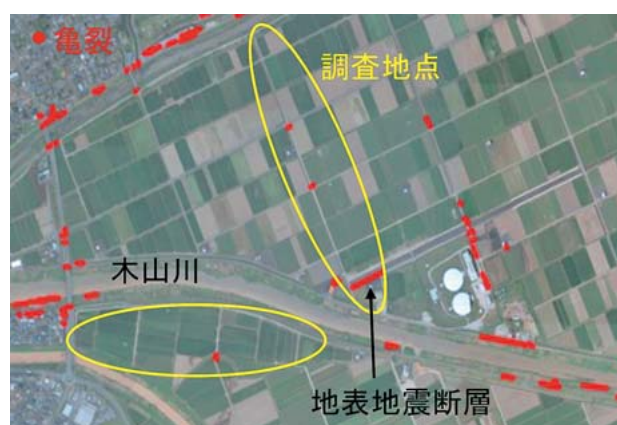
^{a)} 日本土壌インベントリーの土壌図における分類（高田ら，2009）に基づく。

Ⅱ. 材料および方法

1. 調査地点

熊本地震によって被害の生じた熊本市東区（秋津）、嘉島町（上六嘉）、阿蘇市（黒川）の圃場において、地震発生直後の2016年に調査を行なった（第1図、第1表）。同地震では阿蘇盆地から宇土半島にかけての布田川断層に沿うような形で数多くの亀裂が確認されており、3地点はいずれも亀裂が多く発生した地域に位置している。

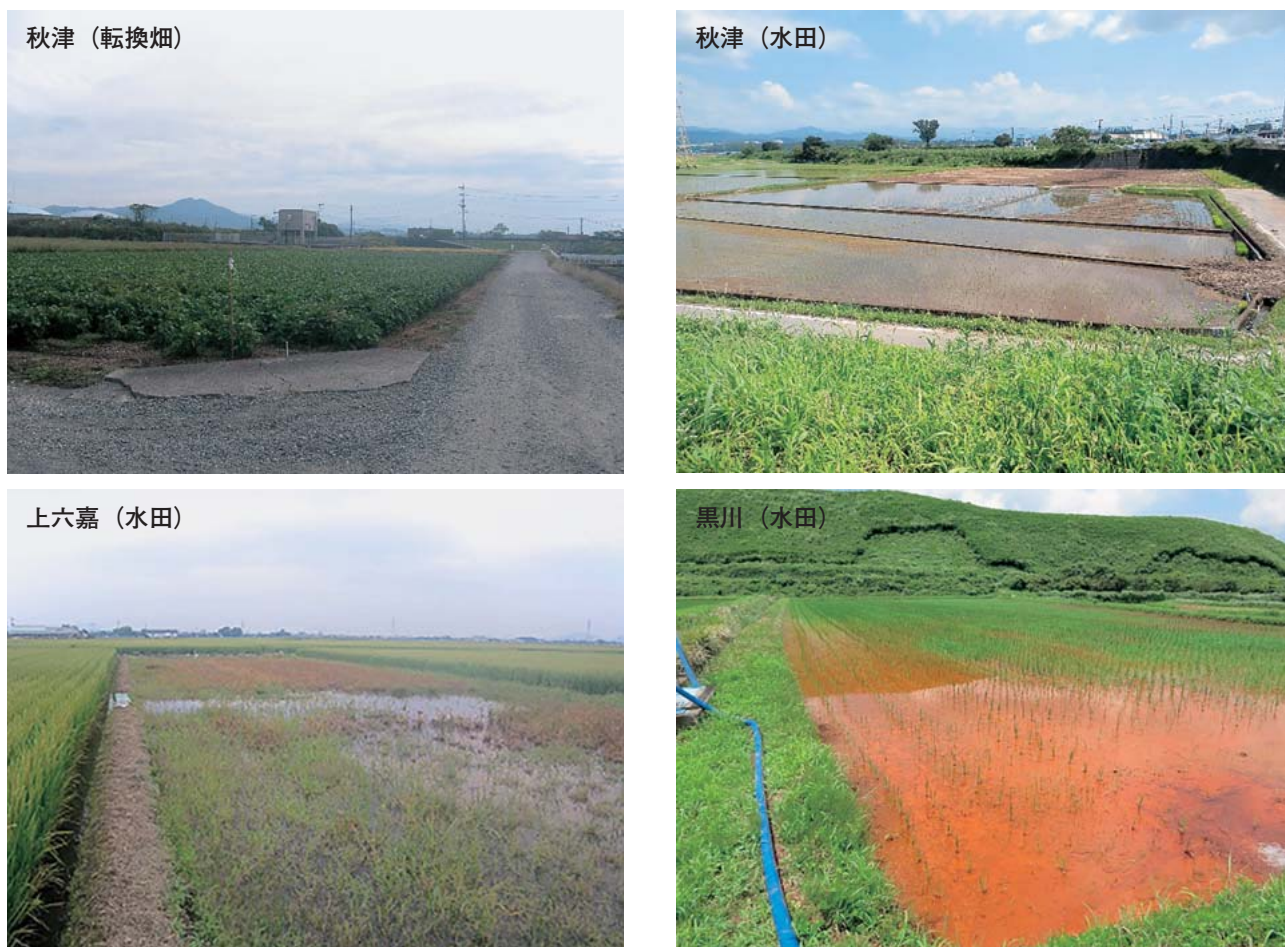
秋津では、木山川（第2図）の北側地区の多くで2016年当初は水稻の作付け予定であったが、地震によってパイプラインなど水利施設に被害が生じたため、同年は転換畑となり大豆が栽培された（第3図左上）。一方で、木山川の南側地区は、同年当初は大豆の作付け予定であったが、上記の北側地区の



第2図 木山川周辺における亀裂の分布と減水深の調査地点^{a)}

a) 国土地理院の電子地形図（標準地図・空中写真・布田川断層帯周辺の地表の亀裂分布図）に調査地点を追記して掲載。

作付け変更ともなって水稻が栽培された。木山川の北側地区では大豆作の、南側地区では水稻作の圃



第3図 調査を行なった圃場の様子（左上:断層に近い秋津の転換畑，右上:不陸の生じた秋津の水田，左下:亀裂の生じた上六嘉の水田，右下:著しい漏水の生じた黒川の水田）

場で減水深を調査した。北側地区では、木山川右岸に大規模な不陸の発生（石塚ら，2019）と共に地表地震断層が出現し（小俣ら，2016），その断層からの距離が異なる8圃場で減水深の測定を行なった。南側地区では一部の圃場に不陸が発生し（脇山ら，2018），不陸のみられた1圃場（第3図右上）と、みられなかった2圃場で、水稻の栽培期間中に減水深の測定を行なった。

上六嘉では、熊本地震の発生時に多くの圃場で冬作の麦類が栽培されていた。同地区では南北方向に細長い亀裂が地表に生じ、亀裂が縦断した圃場では畔の損壊や亀裂周辺の陥没などの被害がみられた。それらの圃場の多くでは畔の補修が行なわれ、一部の圃場では客土を行なうことで、その後に水稻が作付けされた。代かきのための耕起を5月中旬に実施したが、その後に作付けを断念した水田圃場（第3図左下）において減水深の調査を行なった。

黒川では、地震によっていくつかの圃場で亀裂や傾斜、漏水などの被害が生じた。外観被害はみられ

ないものの漏水が著しくなった水田圃場（第3図右下）において減水深の調査を行なった。同圃場では、地震後から灌漑水が圃場の端まで届かなくなったため、天水を利用して5月上旬の雨天日に粗代かきを実施され、その後に5月中旬の雨天日に本代かきを実施された。

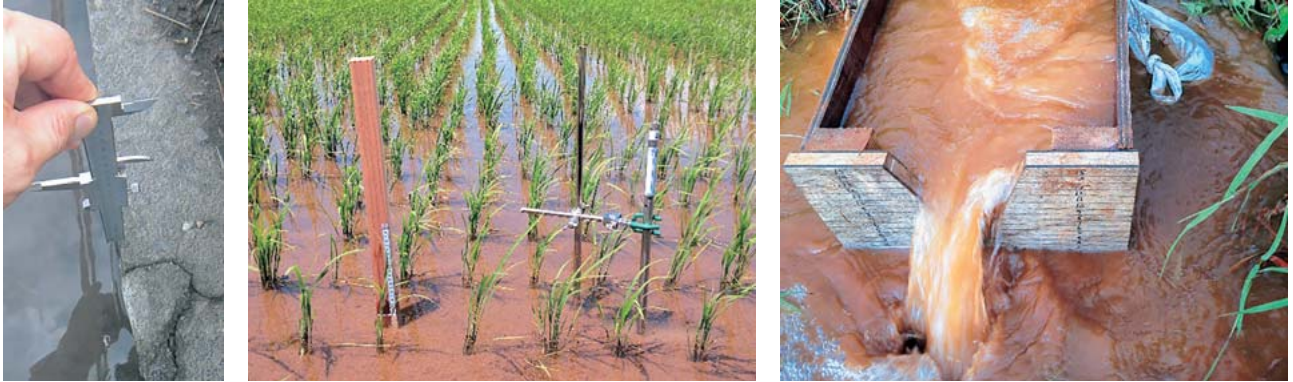
2. 減水深の測定方法

地震による亀裂等は圃場内の局所的な浸透性に影響を及ぼす可能性があると考えられたため、本調査ではN型減水深計などによる代表点での測定は行わず、圃場全体（一筆）の減水深（蒸発散量+地下浸透量）を測定した。第2表に各調査地点における測定方法の概要を示す。

秋津の大豆転換畑では、雨水の水位変化を利用して減水深を測定した。7月13日の大雨（熊本：103.5mm）の直後に断層からの距離が異なる8圃場に溜まった雨水の水位を測定し（第4図左），7月15日にかけて水位変化を約12時間毎に測定することで1日あたりの減水深を算出した。また、測定期

第2表 減水深の測定方法

調査地点	測定期間	測定方法	測器
秋津（転換畑）	7/13～7/15	短期間水位変化	ノギス（Mitutoyo, 530-101）
秋津（水田）	7/15～10/3	長期間水位変化	水位計（TruTrack, WH-HR 250）
上六嘉（水田）	8/31～9/2	短期間水位変化	減水深測定杭（自作）
黒川（水田）	9/1	流量換算	三角堰（自作）



第4図 減水深の測定の様子（左：ノギスによる測定，中央：水位計および減水深測定杭による測定，右：三角堰による測定）

間中の雨量を計算から除くため、自作のバケツ型雨量計（直径21cm）を併せて設置した。測定期間中の合計雨量は48mmであった。なお、転換畑の減水深は他地点の水田とは特性が異なるため、結果および考察はⅢ-1に個別に記載している。

秋津の水田では不陸の生じた圃場を含む3圃場（秋津A, B, C）に7月15日に水位計を設置し（第4図中央）、10月3日の回収時までの時間変化を解析して減水深を求めた。解析では、初めに降雨や流入の影響が少ないと判断したときのデータを抽出し、1時間あたりの水位の減少量を求めた。データの判別は目視により4時間程度、単調に水位が低下していることを基準とした。次に、その水位の減少量から蒸発散量を差し引くことで地下浸透量を算出した。この計算に必要な蒸発散量は、ポテンシャル蒸発量（近藤ら, 1997）に等しいと仮定した。1時間あたりのポテンシャル蒸発量は、「熊本」の気象データから計算された作物気象データベース（Ku wagata et al., 2011）の日平均値を基に、日変化が正弦曲線に従うと仮定して推定した。最後に、測定期間中の地下浸透量の中央値を求めて給水や排水の影響を受けていない時の値とみなした。こうして得られた地下浸透量に測定期間中の蒸発散量の平均値を加えることで、測定期間中の代表的な減水深を求めた。

上六嘉の水田では、亀裂の生じた圃場内の3地点

にスケールを貼付した杭（減水深測定杭）を設置し、8月31日に一時的な入水を行なった後、9月2日にかけて約12時間毎に水位を計測して平均的な減水深を求めた。

漏水の激しい黒川の水田では、水田に湛水させることが困難であったことから、9月1日に灌漑水の流入量を計測して減水深を推定した。すなわち、灌漑水の流入量と減水量が動的平衡状態にあると見なし、取水口に自作の三角堰を設置し（第4図右）、計測された取水流量を圃場面積で除すことで減水深を求めた。ただし、灌漑水が圃場の端まで届かなかったため、圃場面積でなく通水面積で除した場合の減水深も併せて求めた。

3. 圃場用水量の算定方法

秋津、上六嘉、黒川の水田で得られた減水深をもとに、各調査地点の圃場用水量を算定した。ここでの圃場用水量は単純化のため、かけ流しや強制落水等にもなう栽培管理用水量を考慮しない場合の値、すなわち栽培全期間の減水深を求めた。はじめに、各地点で減水深が測定された期間の蒸発散量を計算し、減水深の値から蒸発散量を差し引くことで、当該期間の地下浸透量を算出した。次に、その地下浸透量を全ての期間（6～9月）に当てはめ、各月において蒸発散量を加えることで圃場用水量を算出した。蒸発散量は、先述と同様にポテンシャル蒸発量に等しいと仮定し、秋津と上六嘉は「熊本」、黒

川は「阿蘇乙姫」の気象データから計算された作物気象データベースの日平均値を用いた。一般に、地下浸透量に対して蒸発散量の値は小さいため、ここではポテンシャル蒸発量に対する水田の蒸発散量の比率(Ikawa et al., 2017)やその季節変化(Maruyama et al., 2004)は考慮しなかった。

Ⅲ. 結果および考察

1. 転換畑の減水深

秋津の転換畑（大豆圃場）で得られた減水深を第3表に示す。減水深は106～261mm/dayの範囲で、断層からの距離と減水深との間に負の相関が見られた($r = -0.45$)。ただし、断層に最も近い圃場の減水深が261mm/dayと特に大きく、この地点を除いた場合には、ほとんど相関が見られなかった($r = -0.09$)。

第3表 転換畑における減水深の測定結果

調査地点	断層からの距離 (m)	減水深 ^{a) b)} (mm/day)
秋津 a	50	261
秋津 b	110	197
秋津 c	190	137
秋津 d	270	148
秋津 e	360	152
秋津 f	440	205
秋津 g	520	106
秋津 h	590	186

a) 水位変化に測定期間中の雨量48mmを加えて求めた値。

b) a, f, gを除いて若干の排水あり。

転換畑では湛水試験が困難なため減水深の測定例はあまり多くないが、福本(2013)は土質の異なる複数の大豆転換畑において大雨の直後にインテークレート試験を行っており、減水深に換算して7300～9840mm/day(火山灰土)、48～72mm/day(沖積粘土)、1730mm/day(沖積壤土)の値を得ている。また、足立ら(2011)は重粘土質の大豆転換畑において降雨後の水位測定を行い、減水深に換算して30～70mm/dayの値を得ている。大豆畑に転換後1～2年目の測定例としては、村上(2009)が細粒グライ土の圃場で深度24～35cm層の飽和透水係数を測定しており、その結果を減水深に換算すると0.3～28mm/day(1年目)、6.0～518mm/day(2年目)となる。

以上のように、大豆転換畑の一般的な減水深には測定方法による違いも含めて大きなばらつきがあり、本調査で得られた減水深は、その透水性が(転換畑の状態)栽培管理上の問題となるほど極端に大きい値ではないものと考えられた。ただし、断層に最も近い圃場では減水深が他の圃場に比べて特に大きかったことから、地震によって何らかの影響を受けた可能性がある。

2. 水田の減水深

各調査地点で得られた減水深の値を第4表に示す。田面に不陸が生じた圃場を含む秋津の3圃場の減水深は25～31mm/dayの範囲で、これらの値は土地改良事業計画設計基準(農林水産省, 1993)における減水深の目標値である15～25mm/dayをやや上回っていた。また、不陸の生じた圃場(秋津A)は他の2圃場よりも減水深が4～6mm/day大きかった。一般的には、圃場整備によって変化する地下浸透量が土質によっても異なるが概ね10～100mm/day程度(前川ら, 1983)であることを考慮すると、上記の違いはそれほど顕著ではないと言える。しかしながら、秋津Aに隣接する同様の不陸が生じた圃場では、聞き取りによると漏水が激しく水稻の作付けができなかったことから、この圃場では減水深がさらに大きかったと推察される。

第4表 水田における減水深の測定結果

調査地点	備考	減水深 (mm/day)
秋津 A	代かきあり・不陸あり	31
秋津 B	代かきあり	25
秋津 C	代かきあり	27
上六嘉	代かきなし・亀裂あり	38
黒川	代かきあり	264 (634) ^{a)}

a) 通水部分のみの面積で計算した場合の値を括弧内に併記。

亀裂の生じた上六嘉の圃場の減水深は38mm/dayで秋津の3圃場よりも大きかった。これには、代かきが実施されていないことも影響していると考えられる。一般には、水田の減水深は代かきの有無で変化する。坂田ら(2001)は移植田の減水深が直播田(乾直)の約1/2であったことを報告している。仮に本圃場で代かきによって減水深が1/2になると仮定すると、その値19mm/dayは上記の土地改良における目標値の範囲内となる。しかしながら、2007年の能登半島地震においては、亀裂の生じた水田で漏水

がみられたことが報告されている（北田ら，2008）。このことから、亀裂の影響については、減水深が地表面下の状況によって大きく異なることが考えられる。

一方で、黒川の圃場は減水深が極端に大きく、その値は小さく見積もった場合でも 260 mm/day に達していた。この減水深には畦畔浸透量も含まれるが、周辺の圃場は湛水されており、同圃場でも漏水を防ぐために丁寧な代かきが行われた。また、田面と畦畔を含めて地表には顕著な外観被害が見られなかったことから、これには地下の物理的構造が関わっていることが示唆される。井上ら（2019）は同圃場で水稻収穫後に湛水試験と地下部の電気探査を行い、畦畔の地下部において比抵抗の変化が比較的大きく、そこで漏水が生じている可能性を示している。

以上3地点の調査から、地震後に地表に外観被害のない場合でも減水深が極端に大きい場合があること、逆に不陸や亀裂が生じていても減水深はそれほど大きくない場合があることが分かった。

3. 水田の圃場用水量

各調査地点で見積もられた水田の圃場用水量を第5表に示す。各月の圃場用水量は、季節による蒸発散量の違いを反映して8月に最も大きな値を示した。ただし、対象地点ではいずれも蒸発散量よりも地下浸透量の値が大きかった。圃場用水量は、測定された減水深の違いを反映して地点間差が比較的大きく、減水深と同様に黒川で極端に大きな値（263～265mm/day）を示した。この値は、土地改良事業計画設計基準（農林水産省，2010）における代かき期のピーク用水量 80～120 mm/day を上回っていた。すなわち、水稻の栽培期間全体に渡ってピーク用水量を上回る水需要が生じていたこととなる。なお、今回の計算では地下浸透量を全ての月で一定としたが、黒川で水稻収穫後（12月）に測定された減水深は 160mm/day であり（井上ら，2019）、先

第5表 水稻生育期間における月別の圃場用水量および蒸発散量

項 目	調査地点	6月	7月	8月	9月
圃場用水量 (mm/day)	秋津 A	29	31	31	31
	秋津 B	24	25	26	25
	秋津 C	26	27	28	27
	上六嘉	35	37	37	37
	黒川	263	264	265	264
蒸発散量 (mm/day)	熊本	2.8	4.5	4.9	4.3
	阿蘇乙姫	2.2	3.2	3.6	2.6

に述べた9月の測定値（260mm/day 以上）よりも小さいことから、実際には土壤中の間隙が埋まるなどして地下浸透量が季節変化している可能性がある。また、実際の圃場用水量には、本研究で考慮しなかった栽培管理用水量が含まれる。秋津の不陸の生じた水田では地震後に排水側の田面の標高が取水側よりも極端に低くなり、傾斜した圃場全体に水を充てるため、例外的に常時のかけ流しが行われた。同様のかけ流しは、黒川の傾斜の生じた水田（脇山ら，2019）でも行われており、2004年の新潟県中越地震の際にも被災水田で同様の水管理の問題が報告されている（谷本，2006）。そのため、地震で不陸や傾斜の生じた水田では栽培管理用水量が通常より増えることで圃場用水量が増加する可能性がある。

IV. 摘 要

熊本地震により被害の生じた水田圃場で減水深の測定を行い、断層からの距離や地表面の亀裂・不陸の有無など圃場の外観被害状況によるその違いについて、実態を調査した。得られた結果は以下のよう

1. 断層からの距離が 50～590m と異なる秋津の 8 圃場で測定した大豆転換畑の減水深は 106～261mm/day の範囲で、その透水性が栽培管理上の問題となるほど極端に大きい値ではないものと考えられた。ただし、断層に最も近い圃場では減水深が他の圃場に比べて特に大きな値を示したことから、地震の影響を受けた可能性が示唆された。
2. 不陸の生じた水田を含む秋津の 3 圃場で測定した減水深は 25～31mm/day の範囲で、これらの値は土地改良事業計画設計基準における減水深の目標値である 15～25mm/day をやや上

回っていた。亀裂の生じた上六嘉の水田の減水深は 38mm/day であったが、代かきが実施されていないため、代かき後の減水深は上記の目標値範囲内になるものと考えられた。黒川の水田は減水深が極端に大きく、少なく見積もった場合でも 260mm/day に達した。以上のことから、地震後に地表に外観被害のない場合でも減水深が極端に大きい場合があること、反対に不陸や亀裂などが生じて減水深はそれほど大きくない場合があることが新たに分かった。

3. 減水深から算出された圃場用水量は、黒川で極端に大きな値 (263 ~ 265 mm/day) を示し、6 ~ 9 月の全ての月で代かき期のピーク用水量 (80 ~ 120 mm/day) を上回る水需要が生じていたことが分かった。同水田では、地表には特に外観被害が見られなかったことから、地表面下における土壌の物理構造などが地震の影響を受けて変化したことが示唆された。

引用文献

- 1) 足立一日出・大野智史・古畑昌巳・小倉力・谷本岳 (2011) 本暗渠にモミガラ簡易暗渠と縦型暗渠を組み合わせた重粘土転換畑の排水改良効果の持続性. 農業農村工学会論文集 272:99-105.
- 2) 福本昌人 (2013) 直径 45cm の円筒を用いたシリンドラーインタープレート試験による転換畑の排水性評価. 農工研技法 214:209-220.
- 3) Ikawa, H. et al. (2017) Evapotranspiration in a rice paddy field over 13 crop years. Journal of Agricultural Meteorology 73:109-118.
- 4) 井上敬資・若杉晃介・脇山恭行・野見山綾介・古賀伸久・新美洋・井原啓貴・山口典子・山根剛・中野恵子・田中誠司 (2019) 平成 28 年熊本地震が影響を及ぼした農地の地下部調査. 九州沖縄農研研究資料 95:18-29.
- 5) 石塚直樹・岩崎亘典・坂本利弘 (2019) ドローンを用いた平成 28 年熊本地震が農地の地表に及ぼした影響の調査 -3 次元モデリング解析を活用した不陸評価-. 九州沖縄農研研究資料 95:3-9.
- 6) 北田敬宇・源裕・高瀬裕章 (2008) 能登半島地震による被害水田の復旧対策. 石川農総研研報 28:7-17.
- 7) 近藤純正・徐健青 (1997) ポテンシャル蒸発量の定義と気候湿潤度. 天気 44:875-883.
- 8) Kuwagata, T. et al. (2011) MeteoCrop DB: an agrometeorological database coupled with crop models for studying climate change impacts on rice in Japan. Journal of Agricultural Meteorology 67:297-306.
- 9) 前川俊清・丸山利輔 (1983) 圃場整備に伴う水田浸透量の変化. 農業土木学会誌 51:951-957.
- 10) Maruyama, A. et al. (2004) Seasonal variation in evapotranspiration from mat rush grown in paddy field. Journal of Agricultural Meteorology 60:1-15.
- 11) 村上章・佐々木長市・安中武幸 (2007) 汎用水田における大豆多収を目指した地下水位制御の試み. 土壌の物理性 107:45-55.
- 12) 農林水産省 (1993) 土地利用計画設計基準 計画農業用水(水田). 103p. 農業土木学会発行, 東京.
- 13) 農林水産省 (2010) 土地利用計画設計基準及び運用・解説. 293p. 農業農村工学会発行, 東京.
- 14) 小俣雅志・郡谷順英・谷口薫・榊原庸貴・阿部直樹・頓田修一郎 (2016) 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震に伴って発生した地表地震断層の詳細構造. 日本地質学会第 123 年学術大会講演要旨 :558.
- 15) 坂田賢・堀野治彦・三野徹 (2001) 直播水田における圃場単位の水利用に関する事例的研究. 農業土木学会論文集 212:99-104.
- 16) 高田裕介・中井信・小原洋 (2009) 1992 年の農耕地分布に基づくデジタル農耕地土壌図の作成. 日本土壌肥科学雑誌 80:502-505.
- 17) 谷口智之・佐藤政良 (2006) 耕起乾田直播水田における実測減水深の分析. 農業土木学会論文集 245:691-700.
- 18) 谷本岳・足立一日出・大嶺政朗 (2006) 圃場表層の損壊が用排水管理に及ぼす影響評価 - 用排水管理への影響 (新潟県中越地震による信濃川中流域の水田の損壊に関する緊急調査研究報告). 中央農業総合研究センター研究資料 6:18-22.
- 19) 脇山恭行・榮誠三郎・田中誠司・柴田昇平・野見山綾介 (2019) 平成 28 年熊本地震により被災した水田で栽培された水稻の生育特性. 九州沖縄農研研究資料 95:49-66.

Impacts of the 2016 Kumamoto Earthquake on Water-Table Reduction Rate in Paddy Fields

Atsushi Maruyama and Hiroki Ikawa

Summary

The 2016 Kumamoto earthquake caused cracks and uneven terrains that potentially resulted in additional water leakage from paddy fields. To investigate how the water loss occurred according to different damages, we measured the water-table reduction rate (WTR) in paddy fields in three different areas in Kumamoto-Akitsu, Kamirokka, and Kurokawa. The WTR measured in three fields in the Akitsu area where uneven terrains were created in some parts after the earthquake ranged from 25 to 31 mm/day. These values were slightly higher than the WTR standard range (15 to 25 mm/day) according to the guideline of the Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries of Japan. The field in Kamirokka, which had a large crack, had a WTR of 38 mm/day. This value was not very high considering the fact that the soil puddling for rice transplanting was not practiced in this field after the earthquake. In contrast, despite the absence of apparent damage on the ground surface, the WTR in the Kurokawa field was extremely high and was estimated to be at least 260 mm/day. The daily water use during the rice-growing period based on the WTR in the Kurokawa field largely exceeded the typical range of peak water requirement during the soil puddling season (80 to 120 mm/day). The extremely high water leakage in the Kurokawa field suggests that the soil structure under the ground was altered after the earthquake.

Key words: Crack, Irrigation, Rice paddy, 2016 Kumamoto earthquake, Unevenness, Water-table reduction rate