

熊本地震で生じた農地の不陸が 2016 年度のダイズの生育および収量に及ぼした影響

野見山綾介¹⁾・松尾直樹²⁾・脇山恭行¹⁾・柴田昇平¹⁾・榮誠三郎³⁾・石塚直樹⁴⁾・岩崎亘典⁴⁾・坂本利弘⁴⁾

¹⁾ 農研機構九州沖縄農業研究センター, ²⁾ 農研機構九州沖縄農業研究センター筑後・久留米研究拠点,

³⁾ 熊本県農業研究センター, ⁴⁾ 農研機構農業環境変動研究センター)

要旨：熊本地震により熊本市東区秋津地区にある 54 a の圃場では土面の凹凸（不陸）が波板状に生じたが、均平化することができずにダイズ品種フクユタカが 2016 年 7 月中旬に作付けされた。そこで地震で生じた不陸が 2016 年度のダイズ栽培に及ぼす影響に関する知見を得るために、土面の凹部と凸部で栽培されたダイズの生育・収量調査を実施した。その結果、7 月下旬から 8 月までの栄養成長期の降水量は非常に少なかったため、収穫本数だけでなく、主茎長、主茎節数および分枝数など基本栄養成長量に関しては、土面の凹凸で有意な差は認められなかった。しかし降水量が非常に多かった 9 月以降の生殖成長期には、凹部において葉色の低下や日中の葉温上昇が認められたことから、根粒の窒素固定能や根の吸水能が低下していた可能性が推察された。そして、収穫時において凹部では青立ち個体が多発し、収量は稔実莢数の減少を通して半減した。以上より、熊本地震により著しい不陸が発生した圃場において、凹部では降水が多かった生殖成長期に湿害を受け、窒素供給能や吸水能が低下し、稔実莢数の減少に伴い著しく減収し、青立ち個体も多発する現象が認められた。今後、不陸が生じた圃場で持続的に営農するためには、まず均平化を図ることが望まれるが、やむを得ず不陸が生じたまま栽培する場合は、湿害対策を講じるとともに収穫適期や作業性などにも留意し、不陸に伴う減収を軽減することが重要であると考えられる。

キーワード：熊本地震、湿害、ダイズ、不陸。

2016 年 4 月 14 日以降、熊本県熊本地方を中心に起こった一連の地震活動（熊本地震）は地域の社会および経済活動に甚大な被害を及ぼした。特に 4 月 14 日および 16 日には、気象庁震度階級で最も大きい震度 7 が熊本県益城町において観測され、九州地方では過去にほとんど例を見ない大震災となった。熊本県をはじめとする九州地方には農業が盛んな地域が多く存在するが、地震によってこれらの農地・農業用施設の多くが損壊した。被害数は九州全域で農地 11696 箇所、農業用施設 5260 箇所、被害総額は 713 億円にもなり、九州地方の営農活動に甚大な被害を及ぼした（農林水産省 2017a）。被災水田では破損した水路を応急処置的に復旧させ水稻の作付けを行い、水稻の作付けが困難であった水田ではダイズや飼料作物へ品目転換することで不作付け地の発生を防止した（農林水産省 2017b）。その一方で、震源付近では地震に伴い土面に凹凸（不陸）が生じたが、均平化できずにそのまま作付けされている農地が多く見受けられた。

地震で地盤沈下が起こる場合、農地では土面が均一に沈下せずに不陸が生じることがある。地震の大きさや地質によって不陸の程度は異なるが、2011 年の東北地方太平洋沖地震の際、被害の大きかった茨城県稲敷市の水田では最大約 650 mm もの高低差が確認された（若杉ら 2012）。国が定める整備基準（農林水産省 2015）では、圃場一筆内の高

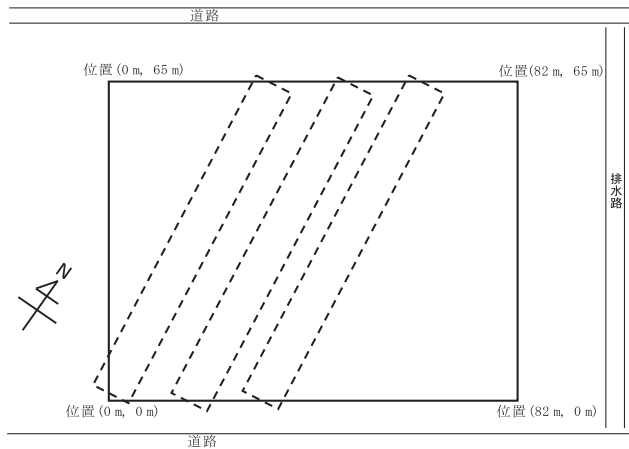
低差は 70 mm 以内に収まることが望まれており、これを大きく上回る場合は農地災害復旧工事あるいは市町村が単独で行う災害復旧工事による復旧が必要である。しかし、査定等の手続きで工事着手までに時間を要するのが現実で、それまでは多くの農家は応急的な復旧によって営農せざるをえず、不陸が栽培作物の生育および収量に影響を及ぼすことが懸念される。小柳ら（2012）は東北地方太平洋沖地震の影響で生じた不陸が、オオムギの生育および収量に及ぼす影響について調査した。その結果、標高が低い凹部において収量が少なかったことを報告している。その要因として、土面が低くなった位置で湿害が繰り返し発生したと考察している。ダイズに関しては、森田ら（2006）が新潟中越地震により発生した水田の被害状況調査に関する報告を行っているが、地震により発生した不陸がどの程度生育および収量に影響を及ぼすかについての報告は見当たらない。

熊本市東区秋津町は県内有数の農業地帯であり、イネ・ムギ・ダイズの大規模なブロックローテーションが行われている。しかし、2016 年度は地震によりパイプラインが破損し 178 ha の農地のうち約 90% に水を送ることができず、水稻の代替作物としてダイズが大規模に作付された。そのため、例年であれば約 50 ha にダイズが作付けされているところ、2016 年度は約 150 ha の面積でダイズが栽培

2017 年 9 月 4 日受理。連絡責任者：松尾直樹 〒 833-0041 福岡県筑後市大字和泉 496

TEL 0942-52-0694, FAX 0942-53-7776, matsuoan@affrc.go.jp

本研究は、平成 28 年度農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業緊急対応研究課題「被災地域の営農再開に向けた熊本地震による農地・作物生育への影響に関する調査研究」の一環として実施した。



第1図 調査圃場の概要。

- 1) 圃場は南北 66 m、東西 82 m の 54 a。
- 2) 位置は南の起点からの距離 (x, y) で示す。
- 3) 2016 年 10 月 7 日の調査は東の点線中の凸部と凹部が隣接する地点において、3 反復を設けて実施した。
- 4) 2016 年 11 月 17 日の調査は東・中・西の点線中をそれぞれ反復 1、反復 2、反復 3 として実施した。1 反復につき凸部と凹部が隣接する 3 地点において調査を行い、3 地点の平均値を各反復の代表値とした。

されることとなった。秋津地区では多くの圃場で不陸が発生したが、発生面積が広範囲におよんだため、土面を均平化することができずにダイズが播種された。そのため、不陸がダイズの生育および収量に影響を及ぼす可能性があると考えられた。そこで、秋津地区で不陸が発生した圃場において、ドローンによる空撮情報を用いて不陸の状態を確認するとともに、土面の凹部と凸部のダイズの生育および収量調査を実施し、地震で生じた不陸がダイズ栽培に及ぼす影響の一事例としてとりまとめた。

材料と方法

1. 圃場の不陸量の計測

熊本市東区秋津町の波板状に不陸が生じた一筆の普通低地水田土圃場（南北 66 m、東西 82 m：第 1 図）を調査の対象とした。地震発生時この圃場ではコムギ品種「ミナミノカオリ」が作付されており、2016 年 6 月上旬まで栽培された。コムギ収穫後は耕起を行い、ダイズ播種前の 7 月 15 日にドローンによる空撮画像に対して SfM (Structure from Motion)・MVS (Multi-view stereo) 技術を用いて圃場土面の不陸量（圃場の平均標高からの差）を計測した。ドローン (Phantom3 Professional, DJI) に標準装備のカメラ (FC300X) を用いて上空 50 m から圃場を空撮した。また、計測時にレーザーレベルを用いて相対的な標高差を数点取得した。取得した画像は解析ソフトウェア (PhotoScan Professional, バージョン 1.2.6, Agisoft) を用いて、3 次元モデルを作成し、不陸量を計測した。その際、国土地理院地図から得た基準点の標高値と、地上計測した基準点からの相対的標高差をモデル作成の際に地上基準点として与え

て解像度約 5 cm の地表面の 3 次元モデルを作成し、不陸量を計測した (石塚ら 2017)。

2. 生育調査

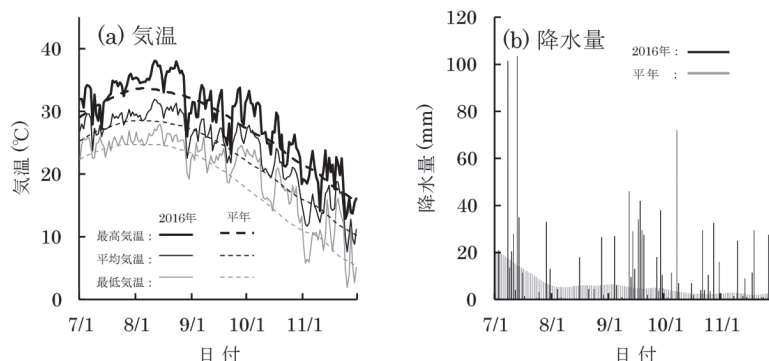
圃場にはダイズ品種「フクユタカ」が作付された。播種作業は正転ロータリシーダを用いて条間 75 cm、2 粒播きで、7 月 16 日から 20 日のいずれかの日において行われた。基肥および追肥はともに施用されず、中耕・培土作業およびカメムシ防除作業は熊本県の指導に準じて適期に行われた。なお、圃場には縦横の畔に沿って地下 50 cm に暗渠管が整備されている。ダイズの子実肥大期である 9 月 27 日に、群落の葉色を観察するために、前述した方法と同様にドローンを用いて空撮した。それから 10 日後の 10 月 7 日に、土面の凹部と凸部におけるダイズの生育調査を実施した。調査は第 1 図の東の点線中の凹部と凸部が隣接する地点において、3 反復を設けて実施した。1 反復につき生育が中庸な連続 10 株を選定し、立毛での主茎長、主茎節数および葉色を調査した。葉色は、葉緑素計 (SPAD-502, コニカミノルタ) で計測した主茎最上位 3 節の複葉の SPAD 値の平均値とした。さらに同日 12 時 50 分に、放射温度計 (FLIR-E8, FLIR) を用いて、南東側の畦畔から群落の熱画像を撮影した。解析ソフト (FLIR Tools, FLIR) を用いて取得した熱画像から凹部と凸部におけるダイズ群落の葉温の平均値を求めた。熱画像撮影時は晴天であった。なお、撮影時には地際からの高さ 1.5 m で気温および湿度を温湿度センサ (3641 humidity logger, HIOKI) で計測した。

3. 成熟整合性程度および収量調査

ダイズの成熟期である 11 月 17 日に坪刈り調査を実施した。調査は第 1 図のように東・中・西の点線中をそれぞれ反復 1、反復 2、反復 3 として実施した。1 反復につき凹部と凸部が隣接する 3 地点においてそれぞれ 3.0 m² (2.0 m × 1.5 m) 坪刈り調査を行い、3 地点の平均値を各反復の代表値とした。採取株は雨の当たらない乾燥室で十分に乾燥させた。採取株のうち生育が中庸な 10 株について、主茎長、主茎節数、分枝数、稈実莢数、1 莢内粒数および 100 粒重を調査し、残りの株については脱穀後、病虫害粒を除いて整子実収量を調査した。整子実収量は全粒重を刈り取り面積 (3.0 m²) で除して算出した。収穫直前に、各地点における立毛連続 10 株について、青立ち程度の判定を行った。判定は、古屋・梅崎 (1993) の成熟整合性程度の簡易判定法に準じた。この基準では、成熟期の地上部の青立ち程度を簡便に 5 段階に分けており、1 に近いほど茎の緑色が残り青立ちが著しく、5 に近いほど葉は良く落葉し茎が品種固有の色になって成熟が正常であることを示す。

4. 気象データ

栽培期間中の気象要素がダイズの生育・収量に及ぼす影響について考察するために、調査圃場から北西側約 8 km



第2図 ダイズ栽培期間における日平均気温、最高気温、最低気温および降水量の経日変化。
 平年値は1981年から2010年までの30年間の観測値を平均で表した。

に位置する最寄りの熊本気象台の気温、降水量および日照時間、ならびにそれらの平年値（1981年～2010年における観測値の平均）のデータを利用した。

5. 統計解析

生育調査および収穫時の調査結果、ならびにドローンによる不陸量計測結果についての統計解析はStudentのt検定で行った。

結 果

1. 気象概況

日平均気温、最高気温、最低気温および降水量の経日変化を第2図に、日照時間の月別値を第1表に示す。気温は栽培期間を通して平年よりもかなり高温で推移した。最高気温については、8月は連日35℃以上に達し、10月中旬でも30℃以上を記録した。降水量は、出芽期の7月下旬から8月にかけては少雨傾向であった。8月は特に少なく、積算降水量は平年値の35%であった。9月以降は一転して多雨傾向となり、9、10月の積算降水量はいずれも平年値の197%、253%にもなった。日照時間は7月下旬から8月にかけては多照、9、10月は寡照、11月は平年並みであった。栽培期間の気象要素をまとめると、出芽期～開花期にあたる7月下旬から8月にかけては高温・少雨・多照であり、開花期～成熟期にあたる9月以降は高温・多雨・寡照であった。

2. 圃場に生じた不陸

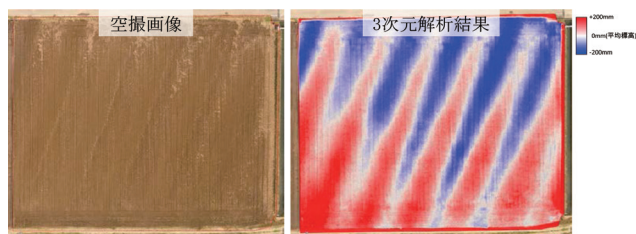
ドローンによる不陸量の計測値は、同地域を計測した航空機LiDARの計測値およそ2.8万点との間で有意な差は認められなかった。不陸量の可視化結果を第3図に示す。不陸は東西方向に波板状に生じていたことが明らかになった。さらに圃場北側に向けて大きく地盤が沈下し北低南高の傾斜が生じたことも明らかになったが、地震前には規則的な不陸や圃場の傾きは認められなかったことを国土地理院の航空レーザー測量のデータより確認している。

本調査の解析対象とした東西方向に生じた不陸について

第1表 ダイズ栽培期間における日照時間の月別値。

年次	7月	8月	9月	10月	11月
日照時間					
2016年	218	270	133	124	168
(h) 平年	185	211	176	190	153

平年値は1981年から2010年までの30年間の観測値を平均で表した。



第3図 不陸量の3次元解析の結果。

- 1) 2016年7月15日（ダイズ播種前）にドローンを用いて上空50mから撮影。空撮画像では、不陸が規則的に（波板状に）生じていることが明らかになった。
- 2) 圃場の比高の平均値からの差分を算出した結果、最小値は-310mm、最大値は280mmで、合計590mmの比高差があった。

は、平均標高を0mmとすると、生育調査を実施した凸部と凹部の標高の平均値はそれぞれ+72mmと-138mmで高低差は210mmであり、収量調査を実施した凸部と凹部は+66mmと-131mmで高低差は197mmであった。また、標高が低い土面では湿害のリスクが高まると考えられるが、平均標高よりも低い土面は圃場全体の52.8%を占めていた。その割合は0mm～-50mmが18.3%、-50mm～-100mmが16.4%、-100mm～-150mmが12.1%、-150mm以下が6.0%であった。

3. 不陸がダイズの生育および収量に及ぼす影響

9月27日の空撮画像では、周囲と比べ葉色が淡い群落が波板状に見られた（第4図）。この葉色が淡い群落は、波板状に生じた土面の凹部と一致していたことから、凹部で葉色が淡くなったことが明らかになった。

10月7日に実施した生育調査では、主茎長と主茎節数は



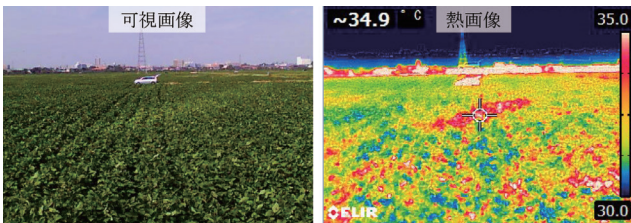
第4図 調査圃場で確認された葉色むら。

2016年9月27日（ダイズの子実肥大期）にドローンを用いて上空50 mから撮影。凹部で葉色が淡くなっていた。

第2表 土面の凸部と凹部が子実肥大期のダイズの主茎長、主茎節数、葉色および日中の葉温に及ぼす影響。

土面	主茎長 (cm)	主茎節数 (no. plant ⁻¹)	葉色 (SPAD 値)	葉温 (℃)
凸部	36.1 ± 1.3	12.9 ± 0.1	45.7 ± 0.3	32.1 ± 0.1
凹部	38.1 ± 2.4	13.1 ± 0.1	37.8 ± 1.2	34.0 ± 0.1
t 検定	ns	ns	**	***

** および *** はそれぞれ1%および0.1%水準で有意差が有ることを、ns は有意差がないことを示す。



第5図 不陸が日中のダイズの葉温に及ぼす影響。

1) 2016年10月7日（ダイズの子実肥大期）の12時50分に放射温度計を用いて、南東側の畦畔から撮影。撮影時の天気は快晴で、気温は29.4℃であった。

2) 凸部と凹部の葉温はそれぞれ32.1℃と34.0℃で、凹部で葉温が上昇していた。

土面の凹部と凸部の違いによる有意差は認められなかったが、SPAD 値は凹部が有意に小さく淡い葉色を呈していた（第2表）。日中のダイズ群落の熱画像から、凸部に比べて凹部のダイズの葉温が顕著に上昇していたことが明らかとなった（第5図）。凹部と凸部の葉温はそれぞれ32.1℃と34.0℃で、凹部の葉温が有意に高かった（第2表）。なお、熱画像撮影時の気温は29.4℃、相対湿度は62.9%であった。

11月17日に実施した刈り調査では、収穫本数、主茎長、主茎節数、分枝数および1莢内粒数は土面の凹部と凸部の違いによる有意差は認められなかった（第3表）。凸部と比べ凹部では、100粒重は有意に重くなったが、稔実莢数の減少に伴い整子実収量は半減した。収穫時の成熟整合性程度は凸部が有意に凹部を上回り、凸部における個体はほぼ完全に枯れ上がったのに対し、凹部では莢が熟色を呈しているにも関わらず茎葉は黄緑色である青立ち個体が目立った。

考 察

1. 不陸について

土面の高低差は、生育調査地点において210 mm、収量調査地点において197 mmであった。これらは国が定める整備基準（圃場一筆内の高低差70 mm以内）よりも大きく上回っていた。地震が起こった際、農地土面に基準値以上の高低差が生じることは、2004年の新潟県中越地震（藤森ら2006、大嶺ら2006）、2007年の能登半島地震（若杉・藤森2008、北田ら2009）、2011年東北地方太平洋沖地震（小柳ら2012、若杉ら2012）においても報告されている。しかしそのいずれにおいても、今回のように土面の凹部と凸部が波板状に規則正しく生じた例は見られていない。谷本ら（2006）は、新潟県中越地震によって農地に生じた亀裂・噴砂の発生位置は、圃場整備前の農道や排水路位置と関係があると考察しており、不陸に関しても、このような過去の土地履歴が関係しているのかもしれない。また、ドローンによる不陸調査は耕起作業の後に行われたものの、圃場内には大きな高低差が観測されていることから、耕起作業で不陸は改善しなかったといえる。

2. ダイズの湿害について

東北地方太平洋沖地震で農地に不陸が生じた際、凹部の

第3表 土面の凸部と凹部が収穫時のダイズの収穫本数、主茎長、主茎節数、分枝数、収量構成要素、収量および成熟整合性に及ぼす影響。

土面	収穫本数 (no. m ⁻²)	主茎長 (cm)	主茎節数 (no. plant ⁻¹)	分枝数 (no. plant ⁻¹)	稔実莢数 (pods m ⁻²)	1 莢内粒数 (seeds pod ⁻¹)	100 粒重 (g)	整子実収量 (g m ⁻²)	成熟整合性程度 (1-5)
凸部	9.9 ± 0.2	42.2 ± 0.2	13.8 ± 0.2	5.5 ± 0.2	509 ± 48	1.60 ± 0.01	26.8 ± 0.1	217 ± 19	4.8 ± 0.0
凹部	10.0 ± 0.2	42.4 ± 0.7	13.7 ± 0.2	5.1 ± 0.1	240 ± 6	1.54 ± 0.03	29.2 ± 0.2	108 ± 2	2.5 ± 0.1
t 検定	ns	ns	ns	ns	**	ns	***	**	***

1) ** および *** はそれぞれ1%および0.1%水準で有意差があることを、ns は有意差がないことを示す。

2) 成熟整合性程度は古屋・梅崎（1993）の方法に準じた。

土壌水分が周囲に比べて高くなっており、オオムギの栽培において湿害が発生したことを小柳ら (2012) は報告している。農地の不陸は乾田直播水稻栽培など、代かきによる均平化作業が図れない場合においても生じやすい (駒村ら 1998)。在原ら (2003) は凹部において水稻の発芽・苗立ち不良が起こりやすいことを明らかにしており、その原因を降水によって凹部が滞水し湿害が発生したためと考察している。これらの調査結果と同様に、今回調査したダイズ圃場においても凹部で土壌水分が過湿となり、湿害が生じていた可能性がある。

ダイズの種子は冠水に対して感受性が高いことが知られており (Woodstock and Taylorson 1981)、播種後に土壌が過湿状態になると出芽・苗立ち不良を招きやすい (Wuebker ら 2001, 中山ら 2004)。栄養成長期においては、土壌の過湿により根系への酸素供給が遮断され、根の呼吸が抑制されるとともに、根粒着生や根粒活性が低下するため (阿江 1985, Sung 1993)、主茎や分枝などの成長量は著しく減少する (Sallam and Scott 1987, 杉本ら 1988a, 杉本ら 1988b)。しかし、調査した子実肥大期の主茎長および主茎節数、ならびに収穫時の収穫本数、主茎長、主茎節数および分枝数には土面の凹部と凸部の違いによる差が認められなかった (第2表, 第3表)。今回の調査で栄養成長期に当たる7月下旬～8月下旬の期間においては、日射量は平年よりも大きく降水量は少ない傾向であった (第2図, 第1表)。このような気象条件下では、凹部に滞水が生じなかった、あるいは滞水が生じても大気の水蒸気要求度が高いため消失する時間が早かったと推察される。このため、栄養成長期には凹部で湿害が起らず、出芽・苗立ちおよび基本栄養成長量には不陸の影響はなかったと考えられる。

ダイズが開花し生殖成長期に入った9月以降は、降水量が平年と比べ非常に多かったため (第2図, 第1表)、標高が低く滞水が生じやすい凹部において湿害発生リスクが高まった。Linkemer ら (1998) は、ダイズの開花始～子実肥大始において1～2日間で30～50 mmの降水が起こると、水はけの悪い圃場では湿害が生じ、水はけの良い圃場と比べて37%減収することを報告している。本調査の開花始～子実肥大始に当たる9月は、2日間以上の断続的な降水が4度生じ、降水量の合計はいずれも30 mmを上回っていたことから (第2図: 9月4～5日, 33 mm; 9月12～15日, 97.5 mm; 9月17～20日, 133 mm; 9月27～30日, 70 mm)、凹部で湿害を引き起こすのに十分な降水量であったといえる。

ダイズは開花以降、生殖器官の成長のために多量の窒素を必要とするが、その大部分を根粒による空気中の窒素固定に依存している (星ら 1978, 高橋ら 2003)。しかし過湿条件においては、根粒の着生数は減少するとともに (Sung 1993)、土壌酸素濃度の低下により窒素固定能も低下するため (阿江 1985)、固定窒素の供給量は著しく減少し、葉身の窒素含有量が減少することが知られている (杉本・佐

藤 1990)。今回調査した葉身のSPAD値は凹部で凸部よりも低くなっていたことから (第2表)、凹部では湿害により根粒活性の低下が起こっていたと考えられる。荒木ら (2007) は、ダイズは湿害を受けると根系の成長が抑制されるとともに、日中の気孔開度が低下することを報告している。凹部の日中の葉温は周囲の群落に比べて高くなっていることから (第2表, 第5図)、この時根系が湿害によるダメージを受け吸水機能も低下していることが示唆された。このように、生殖成長期間における窒素固定能および吸水機能の低下がダイズの乾物生産を制限したため、凹部では稔実莢数が減少し、収量は半減したのと考えられる (第3表)。Linkemer ら (1998) は、ダイズの生育ステージのうち開花始～子実肥大始に湿害を受けると減収することを明らかにしており、同氏らの栽培試験における減収率は37%であった。今回の調査で減収率が約50%と高い値を示したのは、比較対象とした凸部は標高が高く排水されやすいが、凹部は標高が低く滞水しやすいという土面の特性も影響していたと考えられる。凹部で減収した他の要因として、凸部との標高差に伴う光遮蔽の影響も考えられる。しかし、ダイズは光条件が悪いと主茎長が長くなり、分枝数が減少することが指摘されているものの (黒田ら 1992)、本調査における主茎長および分枝節数には凹凸部での差は見られなかったことから、凹部での減収に光遮蔽の影響はなかったのと考えられる。

収量構成要素のうち100粒重は凹部で凸部よりも重くなったが (第3表)、これは莢数の低下を100粒重が補償して収量を保つように作用するダイズの生理的性質によるものである (Egli and Leggett 1975)。

凹部において収穫時に目立った青立ち個体は (第3表)、松田ら (2011) が生殖成長期に圃場が冠水するとダイズの青立ち個体が多く認められたと報告しているように、湿害によってもたらされたものである可能性が高い。一方でダイズの青立ちはカメムシ類の加害によっても助長されることがある。ダイズは莢の伸長中期から子実肥大期にカメムシ類による加害を受けると不稔莢が増加するとされている (大塚 1961, 大塚・西久保 1963)。山崎・井上 (1993) は青立ちが大発生した現地圃場においてカメムシ害との関連性について調査を行ったところ、子実肥大期にカメムシ類による子実吸汁を受けたことで不稔莢が増加した結果、葉・茎から子実への養分転流が阻害され青立ちの多発へ繋がったことを明らかにした。しかし、熊本県病害虫防除所 (2016) の報告によると、2016年の吸汁性カメムシ類の発生は開花期以降平年よりやや少なかったとしていることから、今回の調査においてはカメムシ類による加害が青立ちの発生に及ぼした影響は小さかったのと考えられる。

また、秋津町における圃場の暗渠は不陸に伴い破損していたものが多かったとの情報を秋津飯野土地改良区から得た。調査圃場では確認されていないものの、不陸の程度が大きかったことから、暗渠が破損していた可能性が高い。

そのため、暗渠破損による排水不良も凹部で湿害を助長した一因になったと考えられる。

3. 今後の営農に向けて

圃場に生じた不陸はコンバインによる収穫作業にも影響を及ぼす。例えば、収穫期に降水が生じ凹部で長期間滞水した場合、土面が乾燥するまでコンバインを圃場に入れることができないため、適期収穫が困難となり減収を招く恐れがある。さらに、今回のように広範囲に渡って不陸が生じた圃場では凹部の乾燥程度を遠観で判断するのは難しいため、局所的に泥濘が存在したままコンバインを乗り入れてしまう可能性があると推察される。その場合、土面の高低差も相俟って、コンバインが横転する危険性が生じる。また、コンバイン収穫時に茎部に水分を多く含む青立ち個体が混入すると、脱穀時に汚れが粒に付着しやすくなるため汚損粒の混入率が高まる。汚損粒による等級格下げを回避するためには、コンバイン収穫前に青立ち個体を手刈りで撤去しなければならない。今回のように青立ち個体が密集して発生した凹部では収量は皆無となり、凹部の面積分だけ減収すると推察される。また、青立ち個体が生じた面積が非常に大きく手刈りが困難な場合には、青立ち個体が枯れあがるまで収穫時期をずらすこともあるが、収穫が適期よりも大幅に遅れるため、裂莢や粒の品質低下につながるという問題が生じる。

以上を踏まえて、不陸の均平化を早急に実施する必要がある。代かき機で均平化を図った事例として北田ら（2009）は、地震で生じた土面の高低差は代かきによって170 mmから80～140 mm程度にしかならず不十分であったと報告している。また、水を含んだ土壌は非常に重く移動させるのが困難なので、今回生じた不陸の均平化には乾いた状態の土を移動させることが望ましい。レーザーレベラーを用いれば運土作業と高精度な均平作業を同時に行うことができるので、少ない労力で復旧工事が可能となるが、凸部から凹部へ運土する際に表土層下に存在する心土が凸部でむき出しになる恐れがある。そのため、まず凸部の表土を剥いだ後で心土を凹部へ運搬・整地し、再度表土を戻して整地を行う工法を採用することが一般的であるが、これには多くの労力と時間を費やす。そこで近年では、従来工法よりも労力・時間を縮減できる工法として、レーザープラウとレーザーレベラーを組み合わせた反転均平工法が提案されている。反転均平工法では、レーザープラウにより凸部の表土と心土を反転させた後凹部へ運土し、再度レーザープラウで心土と表土を反転させ、最後にレーザーレベラーで整地を行うという手順を踏む。村中（2008）はこの工法の利点を、従来工法の労力・時間の多くを占める表土剥ぎ作業を省略でき、大幅なコスト削減が可能となるとともに、レーザー管理による高精度な均平作業が行えるために、農家でも短時間に高精度な施工ができることであると報告している。均平化を行うための機械を導入できず、やむを得

ず不陸が生じたまま栽培を行う場合には、凹部における湿害対策を実施する必要がある。過湿条件での出芽・苗立ちの向上には、播種時の種子処理（調湿、消毒）が有効である（中山ら2004）。さらに、栽培期間における排水対策として外周明渠を徹底させるとともに、圃場の凹部に明渠を設けることも有効であると考えられる。また、本圃場においてはブロックローテーションが行われており、ダイズ以外の作物（イネ・ムギ）の生育特性にも不陸の影響が及ぶと考えられる。そのため、これらの作物についても実態調査を実施するなどして知見を収集し、今後起こりうる地震災害に備える必要がある。

謝辞：本調査にあたり、秋津営農組合、秋津飯野土地改良区、および熊本県県央広域本部農林部にご協力頂いた。また、原稿の作成にあたり、農研機構九州沖縄農業研究センターの岡本正弘氏、増田欣也氏から有益なご助言を頂いた。記して心からの謝意を表する。

引用文献

- 阿江教治 1985. 大豆根系の生理特性と増収問題. 土肥誌 60: 679-683.
- 荒木英樹・坂口敏章・金田衣代 2007. 過湿ストレス期およびストレス後におけるダイズの発育、気孔開度と水関係. 日本作物学会中国支部研究集録 48: 20-21.
- 在原克之・岩淵善彦・小山豊 2003. 田面凹凸に起因する乾田直播水稻の出芽不良要因の解明. 千葉農総研報 2: 35-41.
- Egli, D. B. and Leggett, J. E. 1975. Rate of dry matter accumulation in soybean seeds with varying source-sink ratios. Agron. J. 68: 371-374.
- 藤森新作・若杉晃介・谷本岳 2006. 平成16年（2004年）新潟県中越地震による水田の被害. 農工研技報 205: 17-24.
- 古屋忠彦・梅崎輝尚 1993. ダイズ個体における成熟整合性の簡易判定法. 日作紀 62: 126-127.
- 星忍・石塚潤爾・仁紫宏保 1978. 窒素肥料の追肥が大豆の生育と子実生産に及ぼす影響. 北海道農試研報 122: 13-54.
- 石塚直樹・岩崎亘典・坂本利弘 2017. ドローンによる熊本地震被災水田の不陸計測. システム農学会2017年度春季学術講演会in 新潟講演要旨集. 35-36.
- 北田敬宇・源裕・高瀬裕章 2009. 能登半島地震による被害水田の復旧対策. 石川県農総研報 28: 7-17.
- 駒村正治・中村貴彦・飯田厚・中川幸夫 1998. 乾田直播栽培における水田の基盤整備. 農業土木学会誌 66: 1027-1033.
- 熊本県病害虫防除所 2016. 平成28年産大豆収穫物調査について. <http://www.jpnp.ne.jp/kumamoto/H28/data/futusuaku/daizusyu.pdf> (2017/04/28 閲覧).
- 黒田俊郎・郡健次・熊野誠一 1992. ダイズの花房次位別着莢に及ぼす栽植密度の影響. 日作紀 61: 426-432.
- Linkemer, G., Board, J. E. and Musgrave, M. E. 1998. Waterlogging effects on growth and yield components in late-planted soybean. Crop Sci. 38: 1576-1584.
- 松田裕之・森静香・中場勝・藤井弘志 2011. 山形県庄内地域における2008年の開花期以降の冠水がダイズの莢および品質に及ぼす影響. 日作紀 80: 207-212.
- 森田弘彦・亀川健一・足立一日出・谷本岳・細川寿・帆佐直・大嶺政朗・田淵公清・松村修・千葉雅大・横山宏太郎・小南靖弘

2006. 新潟県中越地震による信濃川中流域の水田崩壊に関する緊急調査研究の概要. 中央農研研究資料 6: 1-7.
- 村中健一 2008. 反転均平工法と水稻乾田直播栽培. 農土誌 76: 356-357.
- 中山則和・橋本俊司・島田信二・高橋幹・金榮厚・大矢徹治・有原文二 2004. 冠水ストレスが発芽時のダイズに及ぼす影響と種子含水率調節による冠水障害の軽減効果. 日作紀 73: 323-329.
- 農林水産省 2015. 土木工事施工管理基準の制定について. http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/kyotu_siyosyo/k_kizyun/pdf/doboku_kouji_sekou_kanri_kizyun_zentai_ban.pdf (2017/03/10 閲覧).
- 農林水産省 2017a. 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震の農林水産業関係被害の状況. <http://www.maff.go.jp/j/saigai/zisin/160414/kumamoto/taiou.html> (2017/05/24 閲覧).
- 農林水産省 2017b. 平成 28 年度 食料・農業・農村白書. http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h28/zenbun.html (2017/05/24 閲覧).
- 大嶺政朗・細川寿・帖佐直・足立一日出・谷本岳 2006. 水田の液状化などによる被害の特徴－圃場凹凸の実態－. 中央農研研究資料 6: 14-17.
- 大塚幹雄 1961. イチモンジカメムシの加害時期と大豆の被害について. 九病虫研会報 7: 51-53.
- 大塚幹雄・西久保稲男 1963. カメムシ類による大豆の被害に関する研究 第2報 カメムシの種類による被害の比較並びにアオクサカメムシによる莢の肥大期被害. 九病虫研会報 9: 61-62.
- 小柳敦史・川口健太郎・村上敏文 2012. 東北地方太平洋沖地震により茨城県稲敷市の水田で発生したオオムギの噴砂被害と湿害. 日作紀 81: 212-218.
- Sallam, A. and Scott, H.D. 1987. Effects of prolonged flooding on soybeans during early vegetative growth. Soil Sci. 144: 61-66.
- 杉本秀樹・雨宮昭・佐藤亨・竹之内篤 1988a. 水田転換畑におけるダイズの過湿障害. 第 1 報 土壌の過湿処理が乾物生産と子実収量に及ぼす影響. 日作紀 57: 71-76.
- 杉本秀樹・雨宮昭・佐藤亨・竹之内篤 1988b. 水田転換畑におけるダイズの過湿障害. 第2報 土壌の過湿処理が出液, 気孔開度ならびに無機成分の吸収に及ぼす影響. 日作紀 57: 77-82.
- 杉本秀樹・佐藤亨 1990. 水田転換畑におけるダイズの過湿障害. 第 4 報 湿害発生時における根粒の役割について. 日作紀 59: 727-732.
- Sung, F. J. M. 1993. Waterlogging effect on nodule nitrogenase and leaf nitrate reductase activities in soybean. Field Crop. Res. 35: 183-189.
- 高橋能彦・土田徹・大竹憲邦・大山卓爾 2003. シグモイド被覆尿素側条施肥によるダイズの増収効果. 土肥誌 74: 55-60.
- 谷本岳・足立一日出・大嶺政朗・細川寿・帖佐直 2006. 水田の液状化などによる被害の特徴－亀裂・噴砂の実態と暗渠の被害－中央農研研究資料 6: 8-13.
- 若杉晃介・藤森新作 2008. 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震による農地被害調査. 農工研技報 208: 67-74.
- 若杉晃介・瑞慶村知佳・北川巖・原口暢朗 2012. 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による水田面の起伏 (不陸), 亀裂, 液状化に関する復旧対策技術. 農工研技報 213: 53-62.
- Woodstock, L. W. and Taylorson, R. B. 1981. Soaking injury and its reversal with polyethylene glycol in relation to respiratory metabolism in high and low vigor soybean seed. Physiol. Plant. 53: 263-268.
- Wuebker, E. F., Mullen, R. E. and Koehler, K. 2001. Flooding and temperature effects on soybean germination. Crop Sci. 41: 1857-1861.
- 山崎昌三郎・井上健一 1993. カメムシ類の加害によるダイズの青立ち症状の発生. 北陸病虫研報 41: 89-93.

Effects of the Roughness of Paddy Field After the Kumamoto Earthquake on the Growth and Yield of Soybean : Ryosuke NOMIYAMA¹⁾, Naoki MATSUO²⁾, Yasuyuki WAKIYAMA¹⁾, Shohei SHIBATA¹⁾, Seisaburo SAKAE³⁾, Naoki ISHITSUKA⁴⁾, Nobusuke IWASAKI⁴⁾ and Toshihiro SAKAMOTO⁴⁾ (¹⁾NARO Kyushu Okinawa Agricultural Research Center; ²⁾NARO Kyushu Okinawa Agricultural Research Center, Chikugo Research Station, Chikugo 833-0041, Japan; ³⁾Kumamoto Prefecture Agricultural Research Center; ⁴⁾NARO Institute of Agro-Environmental Sciences)

Abstract : The Kumamoto Earthquake in 2016 caused severe roughness of paddy fields in Kumamoto-city. However, leveling of the soil surface was not performed before planting soybean seeds. Thus, it was anticipated that soybean plants grown in concave positions were exposed to wet injury. In this study, we examined the effect of the roughness of the soil surface on the growth and yield of soybean. The seed yield in the concave position was decreased 50% by the reduction in the number of pods m⁻² compared with seed yield in the convex position. The reason for the reduction in yield was that soybean root in the concave position was damaged by wet injury, which depressed nodule activity and water uptake ability. Therefore, leveling of the soil surface should be performed for succeeding sustainable crop production in such fields. If leveling is not practical, planting seeds which were disinfected and regulated in moisture content should be used for reducing the damage by wet injury in the concave position. Furthermore, it might be effective for enhancing the drainage from the field to dig an open ditch in the concave position.

Key words : Kumamoto earthquake, Roughness of paddy field, Soybean, Wet injury.