

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

若杉晃介*・瑞慶村知佳*・北川 巖*・原口暢朗*

目 次	
I 緒 言	53
II 水田の被害状況	53
1 田面の起伏（不陸）発生状況	53
2 液状化による憤砂	54
3 亀裂の発生状況	55
4 RTK-GPS による測量	55
5 過去の土地履歴との関係	56
III 災害復旧事業による復旧	56
1 災害復旧事業について	56
2 田面の起伏	56
3 液状化による憤砂	57
4 圃場内の亀裂	57
IV 農家による復旧対策について	57
1 田面の不陸修正	57
2 液状化による憤砂の処理	58
3 圃場内の亀裂についての修復	59
V その他の水田施設の修復	59
1 畦畔の被害	59
2 暗渠排水管の不陸	60
3 農道の被害	60
4 末端用排水路の被害	60
VI 結 言	60
参考文献	61
Summary	62

I 緒 言

平成 23 年（2011 年）3 月 11 日 14:46 に東北地方太平洋沖を震源とした観測史上最大のマグニチュード 9.0 の地震は、東北地方を中心に茨城県、千葉県太平洋沿岸部を含む広大な範囲に甚大な被害をもたらした。特に東日本大震災の被災地は農業を基幹産業とした地域が多く、復旧には農地や農業施設の早期の修復が不可欠となる。また、農業機械もほとんどが失われており、今後多くの農家が離農する可能性が懸念されていることから、復興には効率的な営農を可能にし、かつ災害にも強い農地基盤の再構築が必要になるとと思われる。

津波被災農地面積は、農水省の発表によると約 23,600ha といわれ、農地の流出やがれき、土砂の堆積、用・排水機場や水路といった水利施設の破損などのダメージを受けた地域は災害復旧事業による修復が必要となる。その他の被害としては、地震の揺れによる農地の液状化や亀裂、パイプラインの破損などがあり、揺れの大きさや地盤の違いによって被害程度は各地で異なる。本報告では震災による水田の起伏や亀裂、液状化の発生に伴う被害状況を茨城県南東部に位置する稲敷市の利根川沿岸地域を中心に報告し、復旧対策技術について過去の震災での事例を踏まえながら今後の課題を述べる（Fig.1）。

茨城県稲敷市は関東圏内の中でも被害が大きく、約 7,400ha の水田が被害を受け、一時は約 3,500ha が作付け困難であったが、応急的な復旧によって一部の幹線水路から給水可能となり、平成 23 年 8 月時点では約 500ha の水田が作付け出来ない状況である。作付け不能の要因としては、約 180 ha が起伏や液状化によるもので、1 m 以上の高低差が生じている水田も確認された。それ以外に用水機場（十余島用水機場）やパイプラインの破損などがあげられる（Fig.1）。

II 水田の被害状況

1 田面の起伏（不陸）の発生状況

田面の不陸が顕著であった茨城県稲敷市西代地区の水田（100 × 100m 区画）において、起伏状況を調査した（Fig.1）。調査方法はレーザー測量器を用いて 10m メッシュで水準測量を平成 23 年 4 月 28 日に行った。測量標高の平均値を 0 として、各地点の測量標高との差をプロットした（Fig.2）。通常、田面の高低差は ± 25mm 程度であるが、本水田の最大の高低差は約 650mm であった。なお、基盤整備の基準では田面高と計画高との差の標準偏差を 27mm 程度としており、本水田の数値はそれを大きく超えている。また、Fig.2 では田面に 20cm 程度の小さな山が多数できているように見えるが、実際にはなだらかに起伏しており、10m メッシュでの測量では実際の田面の起伏を表現することが難しいことが分かった。

* 農地基盤工学研究領域水田高度利用担当

平成 23 年 12 月 15 日受理

キーワード：田面の起伏，亀裂，液状化，RTK-GPS 測位



Fig. 1 茨城県稲敷市の被害状況
Damage situation in Inashiki-city, Ibaraki

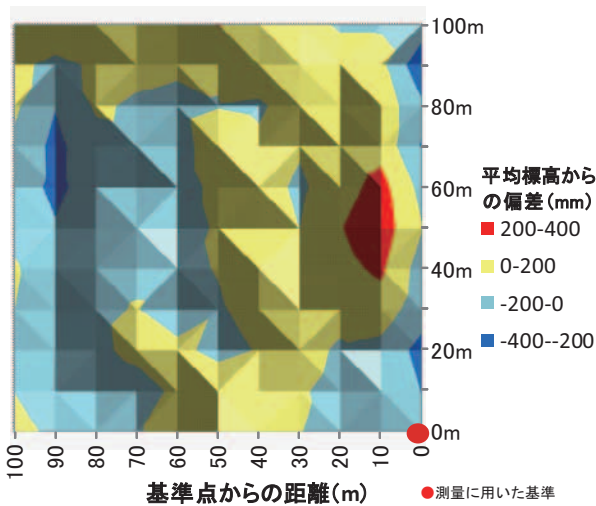


Fig. 2 茨城県稲敷市西代地区における田面の測量結果
Survey results on paddy fields at Nishishiro area in Inashiki-city, Ibaraki

2 液状化による噴砂

液状化とは、地震の際に地下水位の高い砂地盤が地震動により液体状になる現象である。液状化は飽和した砂地盤が振動し、地盤内の水圧が上昇するため発生する。また、その際に地表の弱部から噴水のように砂と水が吹き出す現象を噴砂という。そのため、液状化が起こりやすい条件としては、緩い地盤で下層に砂が多く存在し、高い地下水位によって飽和状態となっていることがあげられる。

前述の測量調査を行った水田の平成 23 年 3 月 29 日時点の液状化による噴砂の発生状況は、圃場の約 1/4 の範囲で確認され、堆積厚は約 10～30cm 程度であった (Fig.3)。噴砂した砂は養分を含まないことから、噴砂した地点は復田後に生育ムラが生じる恐れがある。また、噴砂は耕盤層を破壊して下層から砂が吹き上がるため、噴砂した箇所からは漏水が発生しやすくなる。

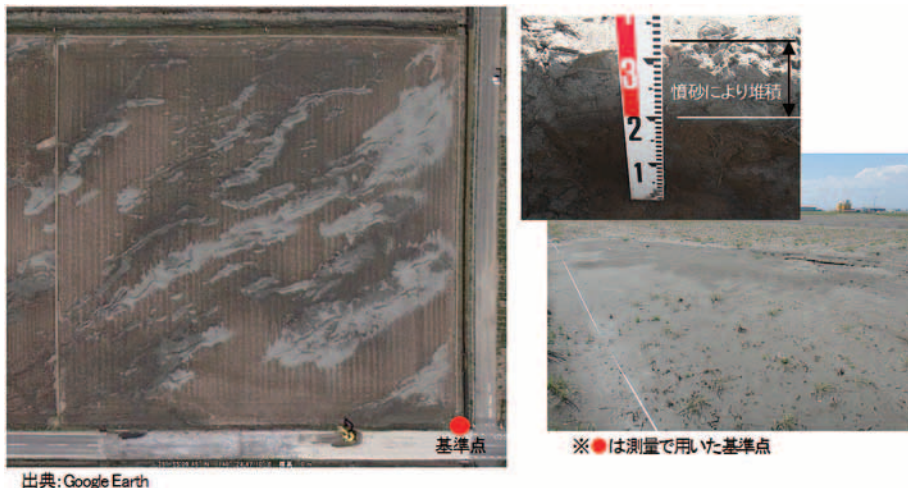


Fig. 3 液状化による噴砂発生状況
Situation of sand boiling occurred by liquefaction

3 亀裂の発生状況

測量した水田に発生した亀裂は数 10 カ所あり、長さは約 10m、深さ 30cm 程度で、最も深い亀裂は 50cm であった (Fig.4)。また、隣接する水田では深さ 100cm を超える亀裂が水田を横断するように 50m 程度発生しており、震災前に作付けしたブロッコリーの収穫ができない状況であった (Fig.5)。深さが 10cm 程度の浅い亀裂は耕起、代かきによってある程度埋めることができるが、耕盤層（地下 20cm 程度）以下の亀裂は漏水の発生要因になりうることから、別途漏水対策をする必要がある。



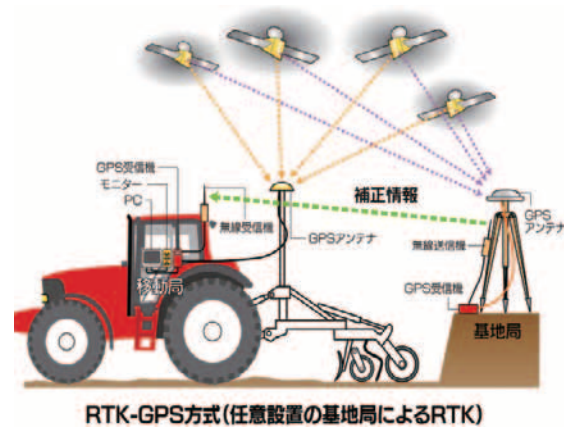
Fig. 4 調査水田内の亀裂発生状況
Crack on researched paddy fields



Fig. 5 隣接する水田の亀裂
Crack on neighboring paddy fields

4 RTK-GPS による測量

RTK（リアルタイムキネマテック）とは、衛星からの位置情報を基地局からの無線、または携帯電話による補正情報を移動局に送り、リアルタイムで補正しながら高精度に位置を測定する方法である (Fig.6)。カーナビなどに用いられている一般的な GPS は誤差 10m 程度の精度であるが、RTK 測位を用いた GPS の誤差は ± 2.5cm 程度と非常に高精度である。

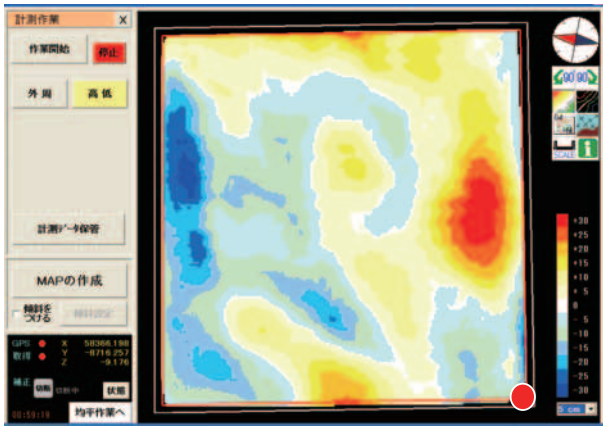


RTK-GPS方式(任意設置の基地局によるRTK)
Fig. 6 RTK 測位と GPS レベラーの概要
Brief summary of RTK positioning and GPS leveler

そこで、前述の茨城県稲敷市の調査水田において、平成 23 年 5 月 18 日に RTK-GPS をトラクタに搭載して測量を行った (Fig.7)。調査は用水路側から排水路側に向かって 2.5m 間隔に走行し、1 秒間に 1 回の測定を自動で行いながら圃場の起伏を調べた。その結果、レーザー測量器による結果と同様に約 60cm の高低差が確認されたが、測点が 121 箇所レーザー測量とは異なり、約 8,000 箇所（0.5m 進むごとに測定）の測点から描かれた高低差 MAP はなだらかに、圃場面が波を打ったように起伏する状況が表現されている (Fig.8)。また、噴砂が発生した地点と高低差には相関性はみられないことから、圃場面の起伏は地震による地盤の沈下や隆起による影響が大きかったことが分かった (Fig.3)。なお、作業時間はレーザー測量では 1ha あたり 4.6 時間・人であったが、RTK-GPS では 1.0 時間・人で大幅な短縮が図れ、かつ高精度な高低差 MAP を描くことができる。また、本測定器は均平化する際の運土量も自動で計算され、高い地点と低い地点がリアルタイムで分かることから、復田する際の均平化の作業時間も大幅に短縮することが可能である。



Fig. 7 RTK-GPS による測量
Survey by using RTK-GPS



※●は測量で用いた基準点

Fig. 8 RTK-GPSによる測量結果(高低差MAP)
Survey results by using RTK-GPS

5 過去の土地履歴との関係

今回調査対象とした茨城県南東部の利根川沿岸地帯は、過去に大規模な河川の付け替えが行われている。農業環境技術研究所の「歴史的農業環境閲覧システム」にて、明治初期から中期にかけて関東地方を対象に作成された「迅速測図」と、現在の道路、河川、鉄道といった土地利用図とを比較することができる。

液状化などの被害が顕著であった地域は旧河道や後背湿地であったところを埋め立てて農地とした箇所が多

く、これらの地帯は地盤が緩く、地下水位が高く、砂が多く存在するといった、前述の液状化現象の発生要因と重なる (Fig.9)。平成16年(2004年)新潟県中越地震においても信濃川沿岸の後背湿地などにおいて、液状化被害が多数発生しており、過去の土地履歴が被害程度の大きさに影響を与えていることが報告されている。

III 災害復旧事業による復旧

1 災害復旧事業について

地震や洪水などによる農地被災の場合、採択要件を満たす被害については農地災害復旧事業によって復旧がなされる。一箇所の工事費が40万円以上のものが対象となり、費用の補助率は国が50%であるが、今回の震災のように著しく甚大な被害は国の処置により激甚災害に指定され、補助の嵩上げにより70~90%を国が負担し、残りを市町村、または農家負担となる。以下に被害ごとに過去の震災を例とした採択要件と事業による復旧方法について紹介する。なお、工事費が40万円未満の場合、市町村等が単独で行う災害復旧がされる場合がある。

2 田面の起伏

圃場の起伏(不陸)に関しては、10mメッシュの水準測量を行い、高低差±5cm以上を被害面積とするのが一般的である。



Fig. 9 茨城県南部の利根川周辺の土地履歴のレイヤー
Layers of land history around Tone-river in South Ibaraki

復旧方法は生育ムラが生じないように表土を剥ぎ取り、心土（下層土）をレーザーブルなどによって整地した後に表土を戻して均平化する。

3 液状化による噴砂

噴砂は圃場内の位置や噴砂口の直径、深さを測定する。噴砂が多い圃場では不陸も生じているため、表土剥ぎをして噴砂した砂を拡散させてから表土を戻す工法が取られる。なお、噴砂が生じた地点は耕盤が破壊されている可能性が高いので、十分に心土を締め固める必要がある。また噴砂した量が少ない場合は、生育ムラが生じないように表土と混合させる（Fig.10）。

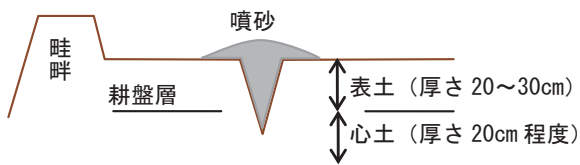


Fig. 10 耕盤層を破壊した噴砂
Sand boiling phenomena destroyed layer of plow soil

4 圃場内の亀裂

亀裂に関しては、亀裂の深さが 41cm 以上（表土厚を 30 cm とし、心土への亀裂が 11cm 以上）であれば復旧事業に採択される（平成 16 年新潟県中越地震の場合）。

復旧方法は亀裂部分の表土を全て掘削し、心土部分の亀裂に心土と同じ土壌を充填し、転圧する。また、傾斜地では亀裂に水が入ることで、法面や畦畔の崩壊が起こりやすくなるため、念入りに転圧をする必要がある（Fig.11）。



Fig. 11 法面の崩壊（能登半島地震）
Collapse of levee slope (Noto Hanto Earthquake in 2007)

IV 農家による復旧対策について

復旧事業の対象にならない被害は農家自身によって修復しなければならない。また、事業の対象となっても事業化までに時間がかかる場合も同様に応急処置をする必要がある。そこで、農業機械などを用いた復旧対策技術について紹介する。

1 田面の不陸修正

代かき機（ロータリーハロー）で均平化を図ろうとする場合があるが、水を含んだ土壌は非常に重く、代かきでは水に浮いた軽い土壌をわずかに動かすだけで、ほとんど運土できず、轍や足跡をならす程度である。そのため、均平化作業は乾いた状態の土を移動させることが望ましい。また、10cm 程度の水深差があっても、栽培管理上の不具合は生じるが水稻の生育は問題ない。過去に 10 cm の高低差が生じるように田面を傾斜化させて水稻栽培を試みたところ、圃場の全体収量は水平な圃場と差がみられなかった（若杉ら 2008）。なお、水深差がある場合の生育初期は波浪による浮き苗を防ぐように水管理を注意する必要がある。

10 cm 以上の不陸においては、レーザーレベラーなどの方法を用いることで修復が可能である。以下にその方法について説明するが、不陸修正や噴砂の復旧後は、地力ムラを原因とする生育不良が生じる恐れがあるため、状況に応じて施肥量の調整を行う必要がある。

a レーザーレベラーによる修復

レーザーレベラーは発光器からのレーザー光線（パルス信号）を受光器が感知し、その光線に追従するようにトラクタに装着した排土板を自動制御することで、均平度 $\pm 15 \text{ mm}$ で整地ができる機械である（Fig.12）。直播や不耕起栽培などによる効率的な作業体系の導入をするには圃場面の均平化は不可欠であり、現在では、担い手農家を中心に全国に約 1,200 台普及している。レベラーの種類には直装型と牽引型があり、使用するトラクタによって選択する（Fig.12, 13）。直装型レベラーの装着に



Fig. 12 レーザーレベラー（直装型）
Laser leveler (Fixed type)



Fig. 13 レーザーレベラー (牽引型)
Laser leveler (Tracked type)

は、レーザーコントロールセットが内蔵されたレーザー対応型のトラクタが必要となるが、牽引型はレベラー側にコントロールセットが付属しているため、既に所有するトラクタでも装着可能である。

また、近年はRTK測位を用いたGPSレベラーも開発されており (Fig.6), 走行しながらトラクタ内に搭載されたパソコン上に自動的に圃場マップを作成し、標高の高い地点から低い地点に効率的に運土することができる (Fig.14)。これまでの試験結果では約4割の作業時間が削減でき、精密農業や栽培履歴管理などに用いることも可能である。

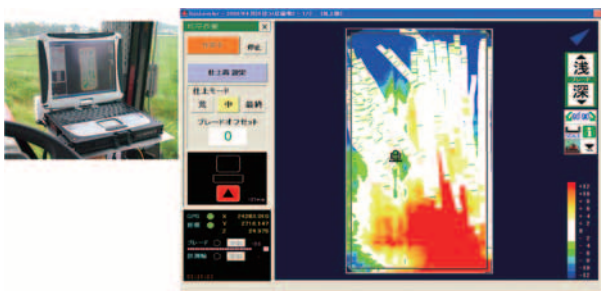


Fig. 14 GPSレベラーに搭載されたパソコン画面
GPS leveler equipped with computer screen

b ブルドーザーによる水張り均平

圃場整備事業においても時々用いられる手法で、水田に水を張って土が露出した高い部分から低い部分にブルドーザーを用いて運土する (Fig.15)。ブルドーザーは比較的に安価にレンタルができるが、水を張りながら運土すると、表面の土を練り返してしまい、透水性の悪い水田にしてしまう恐れがある。なお、透水性が悪くなった圃場は弾丸暗渠などの施工をすることで回復することが可能である。

c トラクタダンプによる運土

トラクタにダンプ機能を搭載した機具を使うことで、高い部分の土壌を低い部分に直接土を運ぶことができる

(Fig.16)。この方法では、平均標高が分からないため、段階的な運土と測量をしながら行う必要がある。



Fig. 15 ブルドーザーによる水張り均平
Ponding land leveling by bulldozer



Fig. 16 トラクタダンプによる運土
Conveyance of soil by dumper tractor

2 液状化による噴砂の処理

液状化による噴砂した砂の処理は、上記の均平作業機によって圃場全体に散らしながら均平化を行う。この際、圃場内のどの部分で噴砂が起り、どの部分の土壌をどこへ運土したか把握しておくことが重要となる。そのため、Fig.3のような航空写真やFig.8のような詳細な高低マップが存在すると、均平化後の生育ムラの原因、漏水箇所などの把握に寄与する。

また、茨城県稲敷市の調査地域における一部の水田では、液状化によって地上に噴出した下層地下水に塩分が含まれており、不陸を修正して作付けした水田及び塩分が溜まった排水路の水を使用した水田において塩害が発生した (Fig.17)。そのため、地区によっては地下から噴出した地下水や砂の成分分析を行った後に作付けをする必要がある。

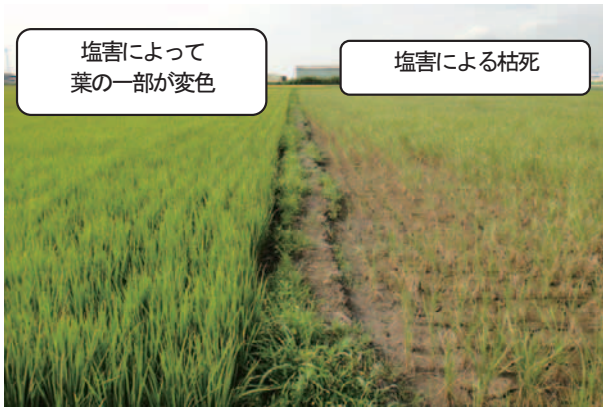


Fig. 17 塩害の発生した水田
Paddy fields damaged by salt injury

3 圃場内の亀裂についての修復

表層の浅い亀裂は念入りな代かきで修復が可能であるが、心土まで亀裂が及んでいれば漏水の発生や、傾斜地では法面の崩壊が起こりやすい。そのため、亀裂部分を掘り起こし、心土と同じ土で再充填する必要がある。なお、地表面からみえない亀裂が発生している可能性もあるため、代かきは念入りに行う必要があり、ベントナイトを 1～1.5t/10a の割合で散布し、土壌と混入することで透水性を低くし、漏水を防ぐことができる（川口 1977）。ベントナイトとはモンモリナイトを主成分とした粘土鉱物で、水を含むと膨張し、間隙を埋める役割を果たす。

V その他の水田施設の修復

1 畦畔の被害

a 土畦畔の修復

不陸が発生した水田の多くは畦畔高（10cm 程度）を超える高低差が発生しているため、畦畔の再施工が必要となる（Fig.18）。畦畔部分に噴砂が見られる場合はその地点からの漏水発生が懸念されるため、掘り起こして



Fig. 18 畦畔の不陸
Configuration of levee

修復する必要がある。噴砂がない不陸の場合はユンボなどで再施工することで修復可能である。また、災害復旧まで時間を要する場合は、部分的な不陸や亀裂の手前に仮畦畔を造成することで作付けが可能となる（Fig.19）。



Fig. 19 仮畦畔の設置（能登半島地震）
Installation of the temporary levee
(Noto Hanto Earthquake in 2007)

b コンクリート畦畔の修復

畦畔にコンクリートを使用している場合は土畦畔とは修復方法は異なる（Fig.20）。コンクリート畦畔の場合、自重があるため不陸の影響により目地のズレが生じている可能性が高く、地上部のみ修復しても地中で目地がずれた箇所からの漏水が発生する。そのため修復には、一度掘り起こしてずれた箇所を止水する必要がある。その他の修復方法としては、畦畔沿いを油圧ショベルで掘削し、90cm幅の畦シートを田面から -70cm、畦畔に 20cm 埋設することで、畦畔からの漏水を防ぐことができる（Fig.21）。



Fig. 20 コンクリート畦畔
Concrete levee



Fig. 21 畦畔際の漏水対策
Leakage control beside levee

2 暗渠排水管の不陸

暗渠排水についても、災害事業の対象となることから、不陸や噴砂が生じた圃場については、暗渠排水管の被害についても調査する必要がある。しかし、地中に埋設している暗渠管の状況を把握することは困難であることから、排水状況から以前の機能を維持しているかで判断する必要がある。なお、修復する必要がある場合、既設の暗渠管の修復はコストがかかることから、新たな暗渠管を施工する方が望ましい。その際に既設暗渠は漏水の発生要因になることから、暗渠の排水口をきちんと塞ぐ処理が不可欠である。

3 農道の被害

農道が被災した場合、農地に作業機械を搬入できないことから、用水の確保と共に早急に修復する必要がある (Fig.22)。修復に時間を要する場合は、応急工事によって、作業機械が通行でき、圃場内の復旧作業や営農ができる状態にすることが重要である。



Fig. 22 農道の被害
Damage of farm road

4 末端用排水路の被害

水田のかんがい、排水機能を確保することは、営農を再開するうえで最も重要となる。用排水路の修復は水路の形状によって大きく異なり、パイプラインか開水路によっても、修復に要する期間や費用は異なる (Fig.23,24)。特にパイプラインは埋設されているため、破損箇所の判別が困難で、圧力のかかった用水を送水すると漏水の可能性が高いため修復に時間を要する。なお、用水路の修復が作付けに間に合わない場合は、河川から直接ポンプで汲み上げるといった応急的な対処が必要となる。

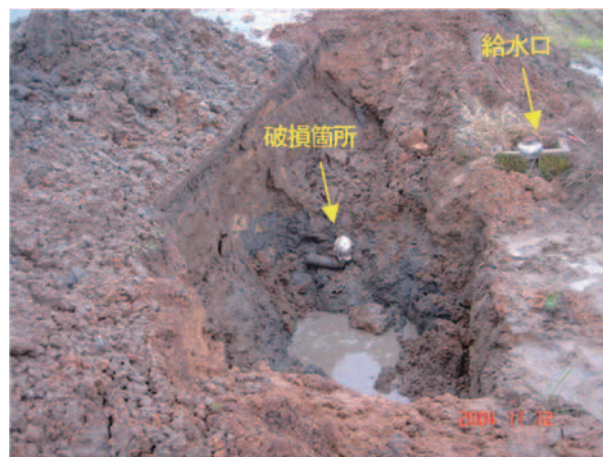


Fig. 23 パイプラインの破損 (新潟中越地震)
Damage of pipeline (Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004)



Fig. 24 排水路 (開水路) の不陸
Configuration of drainage canal (open canal)

VI 結 言

被災した水田において営農を開始するには、かんがいと排水機能の回復と圃場の均平が不可欠である。特に、不陸の修正は水田に水を張るためには不可欠であり、津波による被害を受けた水田で除塩を行う際も、最初に行う必要がある。被害の大きさによって、災害復旧事業を

行うか、農家自身によって修復をするか異なることから、状況に応じた対処方法を知見として集積しておくことが重要である。また、一定の周期で繰り返し起こるとされるプレート型地震について、東海、東南海、南海地震の発生リスクは依然として高く、本報告が将来的に発生の懸念される大規模地震への備えとなれば幸いである。

参考文献

- 1) 土壌学概論 川口桂三郎, 1977
- 2) 農業環境技術研究所, 歴史的農業環境閲覧システム, HP: <http://habs.dc.affrc.go.jp/index.html>
- 3) 農業農村・震災対応ガイドブック 2009, 新潟震災復興研究会
- 4) 藤森新作・若杉晃介・谷本 岳 (2005) :平成 16 年 (2004 年) 新潟中越地震による水田の被害, 農村工学研究所技報, 205 号, 17-24
- 5) 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, 農村工学研究所技報, 208 号, 61-66
- 6) 若杉晃介・藤森新作・北川 巖 (2008) :畑作物の安定的生産を実現する圃場面の傾斜・均平化技術, 畑地農業 ((社) 畑地農業振興会), 5-24

Countermeasure Techniques for Restoration of Undulated, Fissured and Liquefacted Paddy Fields Damaged by the 2011 off the Pacific coast Tohoku Earthquake

WAKASUGI Kousuke, ZUKEMURA Chika, KITAGAWA Iwao and HARAGUCHI Noburo

Summary

The earthquake occurred on March 11th 2011 damaged on vast areas centering on Tohoku area, Ibaraki and Chiba prefectures including their Pacific coastlines. Especially there are many regions relying on agriculture as their key industries in afflicted areas. It is necessary to restore promptly on farm lands and agricultural facilities for their recovery. This report mainly introduces undulated, fissured and liquefacted paddy fields on the damaged area along Tone river located in south eastern part of Ibaraki prefecture. Particularly in the paddy fields at Nishishiro area where experienced greatest damage, was observed a difference of elevation in height of up to 650 millimeters from their highest to lowest points and verified it is difficult for famers to restore the farmland by themselves.

In addition, the report tells restoration techniques carried out by public works and famers by explaining actual cases of earthquake disaster occurred in the past. Also the report describes the superiority of survey and leveling technique by using RTK-GPS. Moreover the report announces countermeasure techniques of agricultural facilities such as levee, subsurface drainage, farm land and brunch canal.

key words : undulation on paddy field, crack, liquefaction, RTK-GPS