

石礫処理工法による土壌改良の評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 28

担当チーム：寒地農業基盤研究グループ 資源保全チーム

研究担当者：大深正徳、横濱充宏、大友秀文、山本弘樹、桑原淳

【要旨】

農地ではしばしば石礫が出現し、営農作業の支障となっている。そのため、国営農地再編整備事業等により、石礫処理を実施し、粒度分布等の改善を図っている。近年の石礫処理工法は、従来の作土層から石礫を取り除く石礫除去工に加えて、石礫破碎工が施工されているが、それぞれの石礫処理工法での施工による土壌物理性（排水性、保水性など）の変化の特徴は明らかではない。効果的な石礫処理工法の選定にあたって、土壌物理性の変化を考慮した工法の適用条件の提示が重要である。本研究は、それぞれの石礫処理工法での施工による土壌物理性の改善に関する知見の集積と、これを基にした石礫処理工法の適用条件を提示することを目的としている。

平成 25 年度から平成 28 年度までに石礫除去工または石礫破碎工を実施した畑から土壌を採取し、石礫処理施工前、整地後、施工後 1 年目、施工後 2 年目、及び施工後 3 年目の土壌の物理性を検証した。その結果、石礫除去工と石礫破碎工も施工後 3 年目までの土壌物理性は良好であった。また、石礫破碎工において、石礫破碎後膨軟になった作土を整地工で締め固めることが営農機械の走行性確保のために有効であることと、石礫破碎工の適用にあたり除礫対象の石礫圧縮強度を把握することが重要であることが認められた。

キーワード：石礫、ストーンローダー、ストーンクラッシャー、含礫率、排水性

1. はじめに

石礫処理施工前の調査圃場の礫の状況を写真-1～写真-3に示す。30mm以上の石礫を作土層に多量に含む農地では、石礫による農作業機械の損傷、農作業効率の低下、作物品質の低下が問題となっている。これらの問題を解決するため、国営農地再編整備事業等により、石礫処理が実施されている。近年では、石礫処理の工法として、従来から実施されているストーンローダーによる石礫除去工に加え、ストーンクラッシャーによる石礫破碎工やピンローラーによる石礫除去工など様々な工法が採用されている。しかし、それぞれの石礫処理工法での施工による土壌物理性（排水性、保水性等）の変化の特徴は明らかではない。

効果的な石礫処理工法の選定にあたって、土壌物理性の変化を考慮したそれぞれの工法の適用条件の提示は重要である。そこで、本研究は、石礫処理工法の施工による土壌物理性の変化を明らかにし、同工法による石礫処理済み圃場の土壌物理性の経年変化等を整理し、それぞれの石礫処理工法の特徴を明らかにし、適用条件を提示することを目的とする。

2. 各種石礫処理工法の施工による土壌物理性の改善

本研究の目的に従い、石礫除去工施工圃場と石礫破碎工施工圃場を選定し、これらの圃場から採取した土壌の各種分析等を実施した。



写真-1 石礫処理施工前圃場 (A 圃場 作物ビート)



写真-2 石礫処理施工前圃場の地表面状況 (A 圃場)



写真-3 礫の混入状況 (A 圃場)

表-1 調査圃場の概要

圃場名	工種	石礫処理工の施工機械	土壌の排水性	既存暗渠	暗渠の施工	調査対象				営農作物 (除礫施工年の作物は除礫作業前植付作物)			
						平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度
A	石礫除去	ローダー	良い	なし	なし	除礫・調査	1年後調査	2年後調査	3年後調査	甜菜	スイートコーン	秋小麦	甜菜
B	石礫破碎	クラッシャー	悪い	なし	暗渠施工	除礫・調査	1年後調査			牧草	牧草		
C	石礫除去	ピンローラー	悪い	有り	有材心破	除礫・調査	1年後調査	2年後調査		牧草	デントコーン	デントコーン 牧草播種	
D	石礫破碎	クラッシャー	良い	なし	なし	除礫・調査	1年後調査	2年後調査	3年後調査	甜菜	緑肥	秋小麦	甜菜
E	石礫破碎	クラッシャー	良い	なし	なし		除礫・調査	1年後調査	2年後調査		小麦	緑肥	秋小麦
F	石礫破碎	クラッシャー	悪い	なし	暗渠施工		除礫・調査	1年後調査	2年後調査		小麦	甜菜	小豆→緑肥

*ストーンローダーは、ローダーと記載した。

**ストーンクラッシャーは、クラッシャーと記載した。

2. 1 調査圃場の概要

表-1に調査圃場の概要を示す。

調査圃場は、北海道河東郡鹿追町内の礫質灰色低地土灰色系土壌の畑で、石礫除去工の施工圃場2圃場と、石礫破碎工の施工圃場4圃場の計6圃場である。

それぞれの石礫処理工法ごとに排水性の良い圃場と悪い圃場で施工前後の土壌物理性を調査するため、暗渠を施工する圃場と暗渠を施工しない圃場を選定した。

平成25年度は、石礫除去工施工圃場2圃場と石礫破碎工施工圃場2圃場、計4圃場を調査した。

平成26年度は平成25年度の4圃場に石礫破碎工施工圃場の2圃場(暗渠施工有・無)を調査対象に追加し計6圃場で土壌物理性の変化を確認するため調査を行った。

平成27年度は、平成26年度に調査した6圃場のうち、平成25年度石礫破碎工施工圃場1カ所を営農者の事情により調査対象から除外し、5圃場について作付による経年変化を確認するため調査を行った。

平成28年度は、平成27年度に調査した5圃場のうち、平成25年度石礫除去工(ピンローラー)施工圃場1カ所を営農事情(牧草化)により調査対象から除外し、4圃場について作付による経年変化を確認するため調査を行った。

各調査圃場での調査日は表-2のとおりである。

土壌の排水性が悪いB圃場では施工前の調査時には新設暗渠が、C圃場では施工前に既設暗渠が設置済みであった。さらに、C圃場の整地後の調査は、有材心破の施工前に実施した。

2. 2 調査圃場における石礫処理工の実施状況

石礫処理は、両工法とも、施工後石礫処理済みの表土厚

が30cm以上確保されるように実施した。石礫除去工での施工は、石礫除去、畑面整地の順に行った。石礫除去に使用した機械はストーンローダー(写真-4)又はピンローラー型自走式除礫機(SFR21-2700S、写真-5)、畑面整地に使用した機械は、7t級湿地ブルドーザー(写真-6)であった。

石礫破碎工での施工は、耕起、石礫破碎、畑面整地の順に行われた。耕起に使用した機械は、10t級クローラトラクターとブラッシュブレイカー(写真-7)であり、石礫破碎に使用した機械は、284ps 農用クローラトラクター(JD-8295RT)とストーンクラッシャー(STC H200、写真-8)であった。畑面整地に使用した機械は、7t級湿地ブルドーザー(写真-6)であった。

ストーンクラッシャーによる石礫破碎は、まず1列目を施工したら、隣の1列分を空けて、さらに隣の列を施工し、次に空けた列に戻って施工した。破碎残しの部分が生じないように施工範囲を重ねながら行った(図-1)。

事業者による平成24年度調査では、ストーンクラッシャーの平均直進作業速度は4m/min程度であった。

なお、本報告では、石礫除去工において石礫除去前を施工前、畑面整地後を整地後、石礫破碎工において耕起前を施工前、石礫破碎後を破碎後、畑面整地後を整地後とし、各石礫処理施工翌年度の収穫後を施工1年後、石礫処理施工翌々年度の収穫後を施工2年後、石礫処理施工から3年後の収穫後を施工3年後と呼称する。

2. 3 調査項目及び方法

2. 3. 1 土壌断面調査

石礫除去工で施工するA及びC圃場と石礫破碎工で施



写真-4 ストーンローダー



写真-5 ピンローラー型自走式除礫機



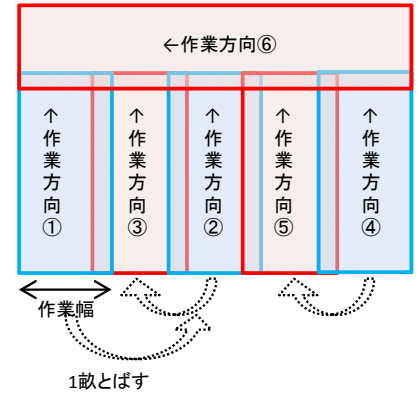
写真-6 湿地ブルドーザー



写真-7 トラクターとブラッシュブレーカー



写真-8 トラクターとストーンクラッシャー



1畝とばす

図-1 ストーンクラッシャーによる

石礫破碎の施工順序

表-2 各圃場の調査日

圃場名	工種	石礫処理工の施工機械	平成25年度			平成26年度				平成27年度		平成28年度	
			施工前	破碎後	整地後	施工前	破碎後	整地後	施工1年後	施工1年後	施工2年後	施工2年後	施工3年後
A	石礫除去	ローダー	H25/11/5~8		H25/11/19,22				H26/10/9		H27/8/20		H28/11/10
B	石礫破碎	クラッシャー	H25/10/12	H25/10/24	H25/10/31,11/1				H26/9/16				
C	石礫除去	ピンローラー	H25/8/8~9		H25/9/19~20				H26/10/1		H27/10/15		
D	石礫破碎	クラッシャー	H25/11/11~12	H25/11/18	H25/11/28~27				H26/9/9		H27/8/25		H28/11/16
E	石礫破碎	クラッシャー				H26/8/8	H26/8/10	H26/8/21~22		H27/9/7		H28/8/26	
F	石礫破碎	クラッシャー				H26/11/6	H26/11/8	H26/11/12		H27/11/5		H28/10/27	

表-3 各圃場の調査箇所数

圃場名	工種	石礫処理工の施工機械	平成25年度			平成26年度			平成27年度		平成28年度	
			施工前	破碎後	整地後	施工前	破碎後	整地後	施工1年後	施工2年後	施工3年後	
A	石礫除去	ローダー	3		3				3		3	
B	石礫破碎	クラッシャー	3	3	3			2				
C	石礫除去	ピンローラー	3		3			2		2		
D	石礫破碎	クラッシャー	3	3	3			3		3	3	
E	石礫破碎	クラッシャー				3	3	3		3	3	
F	石礫破碎	クラッシャー				3	3	3		3	3	

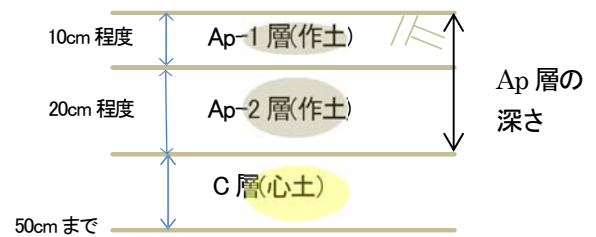


図-2 土壤断面における土層の分類

工するB、D、E及びF圃場にて土壤断面を調査した。土壤断面調査の調査日を表-2に、箇所数を表-3に示す。石礫処理の施工は、作付作物収穫後に行われている。平成24年度の予備調査により、石礫処理の実施による表土層への物理的な影響は最大45cm程度まで及ぶことを確認している。このため、深さ50cmまでの土壤断面を観察することとした。土壤断面を、作土層のAp-1層(プラ

ウ耕後にロータリー耕を掛けた層)、Ap-2層(プラウ耕のみ掛けた層)と、心土層のC層に分類し(図-2)、それぞれの層の層厚を計測して、山中式土壤硬度計で土壤硬度を測定した。

2.3.2 土壤試料の採取と分析方法

土壤の採取方法を図-3に示す。1断面毎に粒度分析用試料として攪乱土(以下、粒度分析用試料と称する)

を Ap-1 層、Ap-2 層、C 層の 3 層に分けて採取した。また、粒度分析用試料とは別に、土層ごとに物理性分析用に 100cc 採土管を用いた試料(以下、100cc 採土管試料と称する) 3 個と、化学分析用に攪乱土 500g (以下、化学分析用試料と称する) を採取した。ただし、一部の層では石礫が多く 100cc 採土管試料を採取できなかつた。粒度分析用試料は粒度分布、100cc 採土管試料は乾燥密度、三相比、孔隙分布及び飽和透水係数の測定に、化学分析用試料は全窒素含量、全炭素含量、保肥力 (CEC) の測定に供した。表-4 に各分析項目と分析方法を示す。

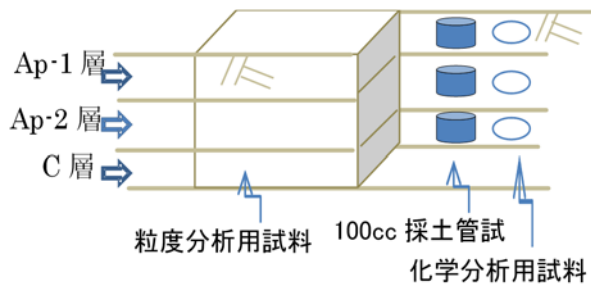


図-3 土壌の採取方法

表-4 分析項目と分析方法

分析項目	分析方法
粒度分布	JIS A 1204 : 2009.6
乾燥密度	24 時間通風乾燥
三相比	実容積法
孔隙分布	砂柱法、遠心法
飽和透水係数	変水位法
全炭素含量	燃焼法
全窒素含量	燃焼法
保肥力 (CEC)	ショーレンベルガー法

2. 3. 3 畑地浸入能及び現場透水試験

各調査圃場にて、シリンダーインテークレート法²⁾により、畑地浸入能を測定し、ベーシックインテークレート(以下、Ib と称する) を得た。調査箇所数は、1 圃場あたり 1 カ所 (装置は 1 カ所あたり、1 組 3 連) であり、調査時期は、施工前と整地後、施工 1 年後及び施工 2 年後である。なお、B 及び C 圃場では、暗渠間隔がともに 12m であったため、暗渠から 6m 離れた渠間で測定し、F 圃場の暗渠間隔は 10m であったため、暗渠から 5m 離れた間隔で測定した。また、圃場排水性を把握するため平成 27 年度と平成 28 年度に各圃場で 1 カ所 (3 連/カ所) の現場透水試験 (変水位法) を行った。表-5 に畑地浸入能と現場透水試験の年度ごとの調査状況を示す。

表-5 畑地浸入能及び現場透水試験の年度別調査内容

圃場名	工程	石礫処理工の施工履歴	平成25年度			平成26年度			平成27年度			平成28年度		
			畑地浸入能測定(シリンダーインテークレート法)						現場透水試験					
			施工前	破砕後	整地後	施工前	破砕後	整地後	施工1年後	施工1年後	施工2年後	施工2年後	施工2年後	施工3年後
A	石礫除去	ローダー	1			1			1			1		
B	石礫破砕	クラッシャー	1	-	1				1			1		
C	石礫除去	ピンローラー	1		1				1			1		
D	石礫破砕	クラッシャー	1	-	1				1			1		
E	石礫破砕	クラッシャー				1	-	1				1		
F	石礫破砕	クラッシャー				1	-	1				1		

3. 結果

3. 1 土壤断面調査

3. 1. 1 圃場の作土厚

石礫除去工で実施した A 及び C 圃場の調査時期ごとの作土厚 (Ap-1 層+Ap-2 層) を図-4 に整理した。

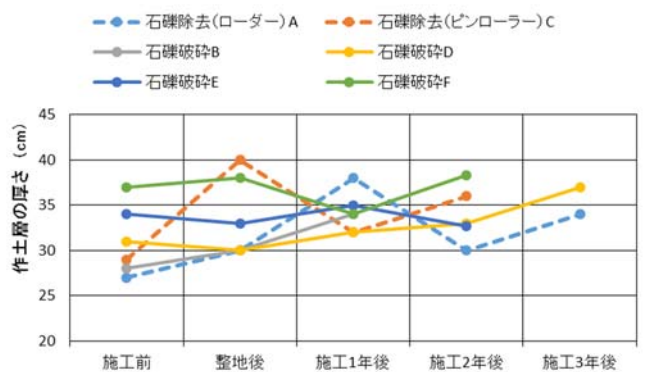


図-4 石礫処理工の作土層の厚さ

圃場平均の作土厚は、A 圃場で施工前 27cm から整地後 30cm に、C 圃場での作土厚は、施工前 29cm から整地後 40cm、施工 2 年後の作土厚は A 圃場では 30cm、C 圃場は 36cm となっている。

石礫除去工の A 及び C 圃場は施工前の作土厚が 30cm 以下であったが、施工後は 30cm 以上となっている。整地後、及び施工 2 年後または 3 年後までにおいて、作土厚は同程度であった。

石礫破砕工で実施した B, D, E 及び F 圃場では、土壤断面調査を施工前、破砕後、整地後に実施した。図-4 に石礫処理施工前、整地後及び施工後の作土厚の変化、図-5 に石礫破砕工施工時の施工前、破砕後、整地後の作土厚を整理した。

石礫破砕工の B 圃場の作土厚は、施工前 28cm から破砕後に 42cm に、整地後に 30cm となり、施工 1 年後は 34cm となった。

D 圃場の作土厚は、施工前の 31cm から、破砕後に 43cm に、整地後に 30cm となり、施工 1 年後、施工 2 年後、施工 3 年後は 32cm、33cm、37cm となっている。

E 圃場の作土厚は、施工前 34cm から破碎後に 42cm に、整地後に 33cm となり、施工 1 年後、施工 2 年後は 35cm、33cm となった。F 圃場の作土厚は、施工前 37cm から整地後に 38cm となり、施工 1 年後、施工 2 年後は 34cm、38cm となった。なお、F 圃場の破碎後の土壌断面調査において作土層の境目が不明瞭であった。そのため、F 圃場の破碎後の第 1 層目の値を Ap-1 層、Ap-2 層の値として整理した。

石礫破碎工の実施圃場での作土厚は、施工前から破碎後に膨軟となるため増加するが、整地により層厚が低下し、施工前と施工後、施工 1 年後、施工 2 年後及び施工 3 年後は施工前と同程度であった。

排水性の悪い B、C 及び F 圃場と排水性の良い A、D 及び E 圃場との差は確認されなかった。

石礫除去工及び石礫破碎工の実施圃場において、施工前の作土厚が 30cm 以下の薄い圃場は、石礫処理後の作土厚が 30cm 以上に増加している。施工前の作土厚が 30cm 以上の圃場では、表土厚の増加傾向は認められなかった。石礫処理後の施工 1 年後、施工 2 年後及び施工 3 年後において作土厚は同程度であることが確認された。また、圃場の暗渠の施工の有無による差は認められなかった。

以上から、作土厚に関して工法の違いによる変化はないことが示唆された。

工の A 及び C 圃場の Ap-2 層は、施工 1 年後、施工 2 年後及び施工 3 年後とほぼ同程度の値で営農作業に適した範

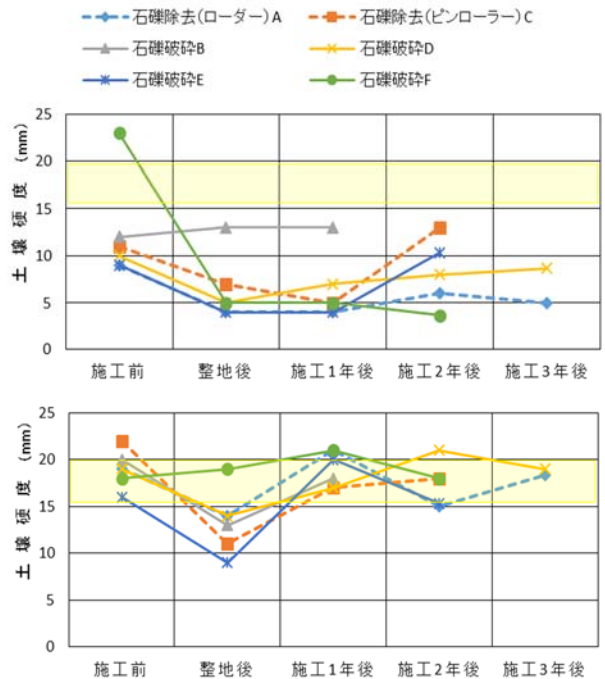


図-6 石礫処理工の土壌硬度
上段：Ap-1 層、下段：Ap-2 層

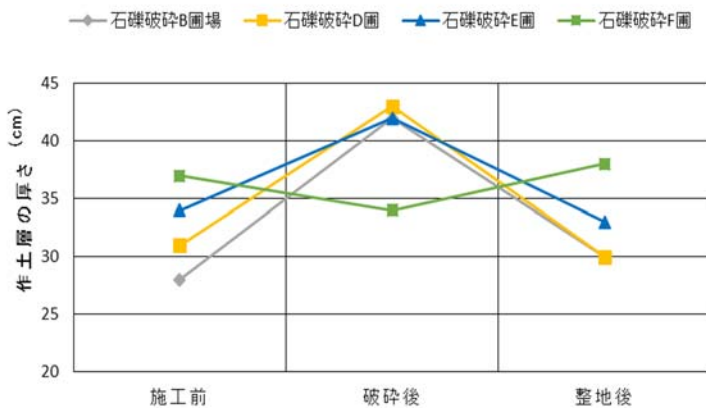


図-5 石礫破碎工施工前後の作土層の厚さ

3. 1. 2 土壌硬度

図-6 に、石礫処理工の土壌硬度、図-7 に石礫破碎工施工前後の土壌硬度を示す。畑では土壌硬度が 20mm 以上になると耕盤層と判定される³⁾。耕盤層は、透水性が低いため排水不良の原因となる場合がある。営農作業には土壌硬度 16~20mm が良いとされている³⁾。

石礫除去工を実施した A 圃場の Ap-2 層では、土壌硬度は整地後低下し、施工 1 年後に増加、施工 2 年後に再度低下し、施工 3 年後は施工前と同程度であった。石礫除去

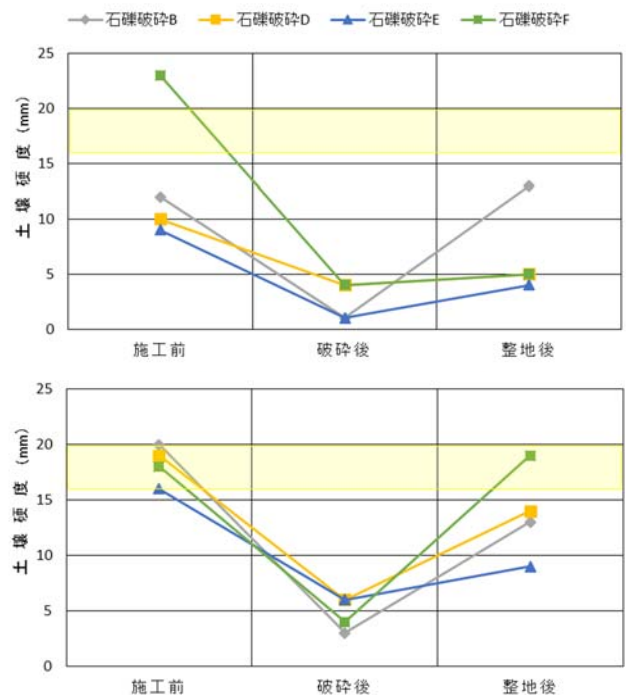


図-7 石礫破碎工施工前後の土壌硬度
上段：Ap-1 層、下段：Ap-2 層

圃であった。

石礫破碎工では、土壤硬度は、Ap-1、Ap-2層とも破碎後低下し、整地後に増加しているが、施工前より低い圃場が多い。Ap-2層では、施工1年後、施工2年後及び施工3年後は施工前とほぼ同程度の値となっていた。施工2年後のD圃場や、施工1年後のE、F圃場で土壤硬度が20mmから21mmを示したが、翌年には20mm未満に下がっている。

石礫処理工実施後のAp-1層の土壤硬度は全ての圃場で20mm以下と耕盤層は形成されていなかった。

施工1年後の石礫除去工のA圃場、石礫破碎工のE、F圃場と施工2年後の石礫破碎工のD圃場のAp-2層では土壤硬度が20mmから21mmと高めの値を示したが、翌年には20mm未満に低下しており、石礫除去工の施工法の違いよりは、営農作業による作土層土壤硬度への影響が示唆される。

石礫破碎工では破碎後の作土の土壤硬度が5mm以下に大きく低下し、整地後Ap-1層の土壤硬度は回復していないが、Ap-2層の土壤硬度が10mm程度以上に回復している。石礫破碎工において、施工直後の営農機械の走行性確保のため破碎後に整地を行うことが重要と認められる。

排水性の悪いB、C及びF圃場と排水性の良いA、D及びE圃場とで有意な差は確認されず、圃場の過湿条件による土壤硬度の違いは認められなかった。

3.2 乾燥密度

図-8に、各圃場の乾燥密度、図-9に石礫破碎工施工前後の乾燥密度を示す。

石礫除去工を実施したA及びC圃場のAp-1層、Ap-2層の乾燥密度は、C圃場のAp-2層で施工前に比較して整地後及び施工1年後が小さくなっているが施工2年後は増加し、A圃場も整地後及び施工3年後まで緩やかに増減し、施工前と同程度であった。

石礫破碎工を実施したB、D、E及びF圃場のAp-1層、Ap-2層の乾燥密度は、施工前と比較して破碎後が小さかった。また、破碎後と比較して整地後は大きくなっていった。施工1年後及び施工2年後若しくは施工3年後までの乾燥密度は緩やかに増減し、変化の傾向は認められない。石礫破碎工では、破碎後に土壤が膨軟になり、整地後に締め固められていることが確認された。

3.3 固相率

図-10に、各圃場の固相率、図-11に石礫破碎工の実施前後の固相率を示す。

畑における土壤診断基準では、低地土の作土の固相率は、40vol%以下が良いとされている³⁾。

施工前のAp-1、Ap-2層は、F圃場のAp-1層、D圃場のAp-2層を除き40vol%以下であった。

石礫除去工を実施したA及びC圃場のAp-1層、Ap-2層では、施工前と施工後、施工1年後、施工2年後及び施工

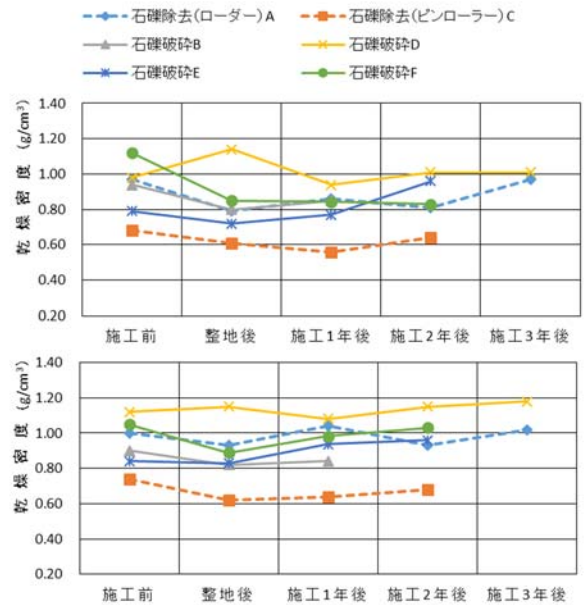


図-8 乾燥密度
上段：Ap-1層、下段：Ap-2層

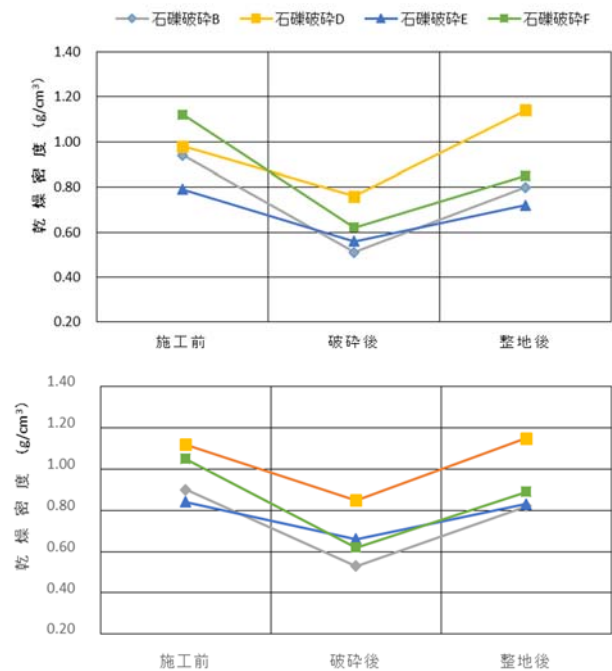


図-9 石礫破碎工施工前後の乾燥密度
上段：Ap-1層、下段：Ap-2層

3年後において施工前の値と比較し、有意な差は認められなかった。

石礫破碎工を実施した4圃場のうち、D圃場のAp-2層は整地後、施工2年後及び施工3年後に40vo1%以上を示

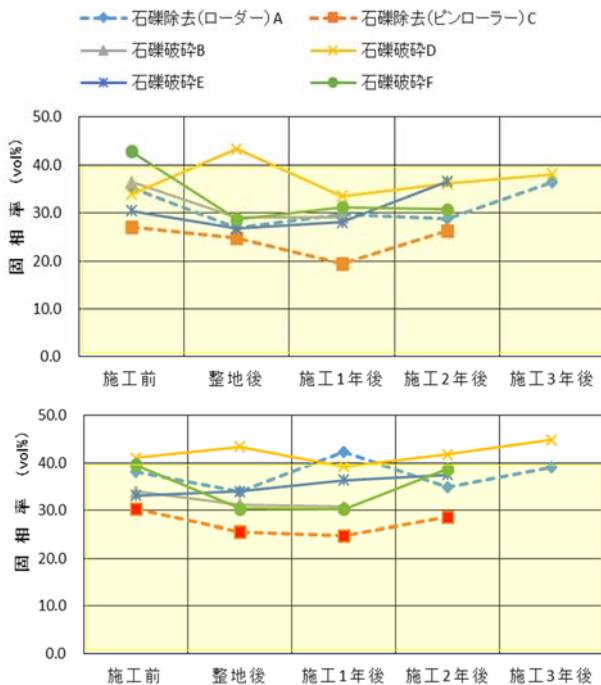


図-10 固相率
上段：Ap-1層、下段：Ap-2層

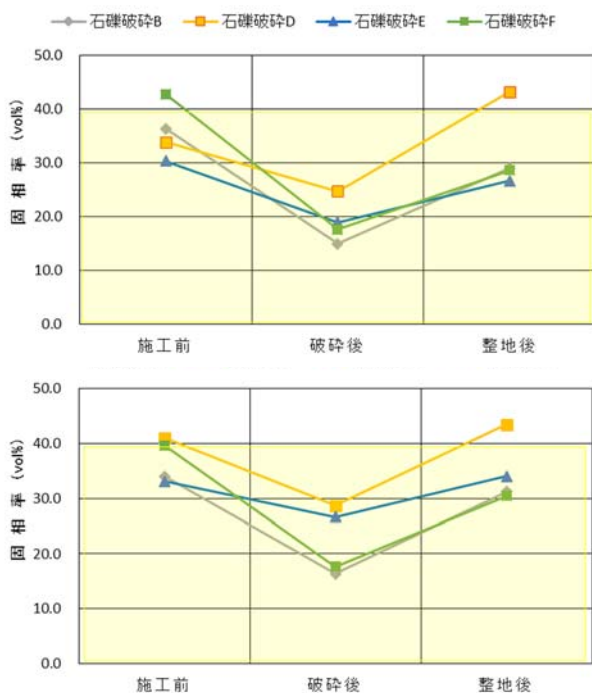


図-11 石礫破碎工施工前後の固相率
上段：Ap-1層、下段：Ap-2層

したが、施工1年後は39vo1%で、施工前が41vo1%であった。4圃場とも施工前の値と施工後から施工3年後まで値が増減し、固相率が経年的に増加することはなかった。

破碎後は、破碎前と比較して固相率が低下し、作土が膨軟な状態であることが分かる。破碎後と比較し整地後の固相率は全圃場で増加していた。整地による締め固めの効果が認められる。

排水性の悪いB、C、F圃場と排水性の良いA、D、E圃場との比較では、固相率変動の差は認められなかった。

圃場の排水性及び除礫施工法の違いによる差は認められなかった。

3.4 粗孔隙量

図-12に各圃場の粗孔隙量、図-13に石礫破碎工の実施前後の粗孔隙量を示す。

粗孔隙量は排水性の指標となり、畑では15~25vo1%が作物生育にとって良いとされている³⁾。本報告ではpF1.8以下を粗孔隙量として整理している。

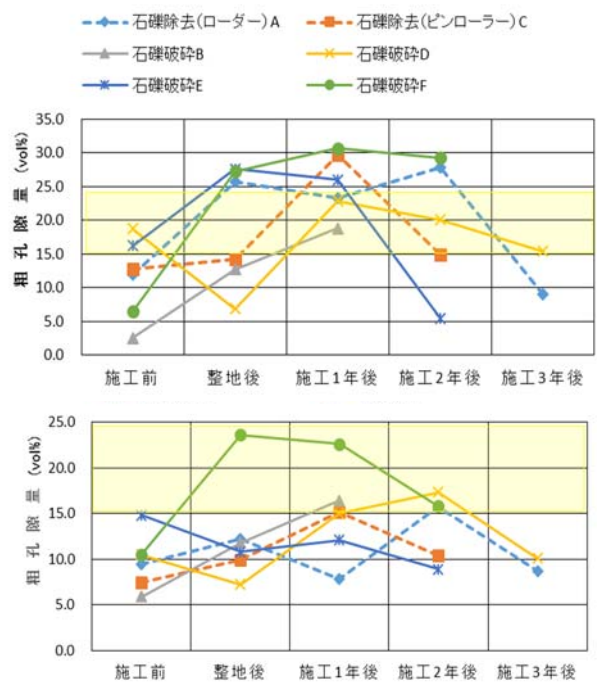


図-12 粗孔隙量
上段：Ap-1層、下段：Ap-2層

石礫除去工を実施したA及びC圃場のAp-1層、Ap-2層の粗孔隙量は、整地後、施工1年後から、各圃場最終調査年度の施工2年後若しくは施工3年後まで増減し、施工前の値と同程度であった。

石礫破碎工を実施した4圃場のAp-1層、Ap-2層の粗孔隙量は、施工前と比較して破碎後で多く、破碎後と比較し

て整地後で少なかった。排水性の悪いB、F圃場のAp-1層、Ap-2層では施工前と比較して整地後、施工1年後の粗孔隙量が多くなっていたが、F圃場の施工2年後の粗孔隙量は低下し、Ap-2層では施工前と同程度に近づいている。

排水性の良いD、E圃場は施工後の粗孔隙量が年により増減しているが、特に傾向は認められない。

圃場の排水性及び除礫工法の違いによる差は認められなかった。

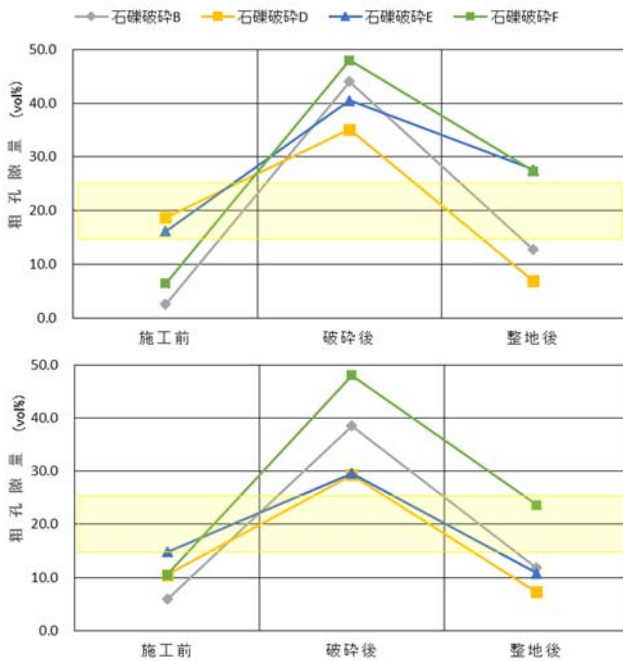


図-13 石礫破碎工施工前後の粗孔隙量
上段：Ap-1層、下段：Ap-2層

3.5 易有効水分量

図-14に各圃場の易有効水分量、図-15に石礫破碎工の実施前後の易有効水分量を示す。易有効水分量は、植物が容易に吸収できる土壌水の量を示す⁴⁾。畑では、10vol%以上が良いとされている³⁾。本報告では、pF1.8-pF2.7を易有効水分量としている。

易有効水分量は、石礫除去工を実施したA及びC圃場のAp-1層、Ap-2層において、C圃場のAp-2層では増加し適正值になったが、その他は施工前から概ね適正值で有意な変動は確認されなかった。

石礫破碎工を実施した4圃場についても、F圃場のAp-1層は施工前より増加したが、それ以外は施工前概ね同程度で、特に傾向は認められなかった。

また、排水性の悪いB、C及びF圃場と排水性の良いA、D及びE圃場とでは有意な差も確認されなかった。

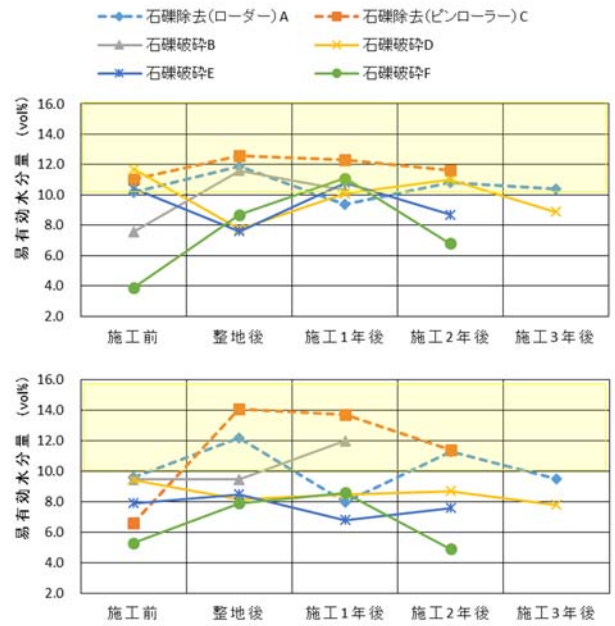


図-14 易有効水分量
上段：Ap-1層、下段：Ap-2層

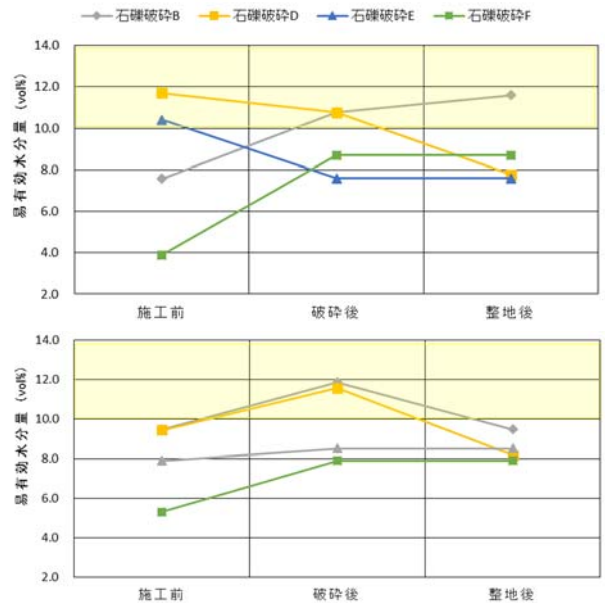


図-15 石礫破碎工施工前後の易有効水分量
上段：Ap-1層、下段：Ap-2層

3.6 飽和透水係数

図-16に各圃場の飽和透水係数、図-17に石礫破碎工の実施前後の飽和透水係数を示す。

飽和透水係数は、土中の水の通りやすさを示しており、畑では $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$ の範囲が適正とされている³⁾。

石礫除去工を実施したA圃場は、施工2年後のAp-2層を除き飽和透水係数が適正な範囲にあった。同じく石礫除去工を実施したC圃場では、施工前のAp-2層で飽和透水

係数が 10^{-6} cm/s となっており、透水性の悪い層があった。しかし、整地後以降、Ap-1 層、Ap-2 層の飽和透水係数は適正な範囲になった。

石礫破碎工を実施した 4 圃場では、破碎後 10^{-1} cm/s まで透水性が増した。整地後以降は E 圃場の Ap-1 層を除き、同程度か再び低減している。破碎後と整地後を比較すると E 圃場の Ap-1 層以外は透水性が低下し、適正値の範囲と

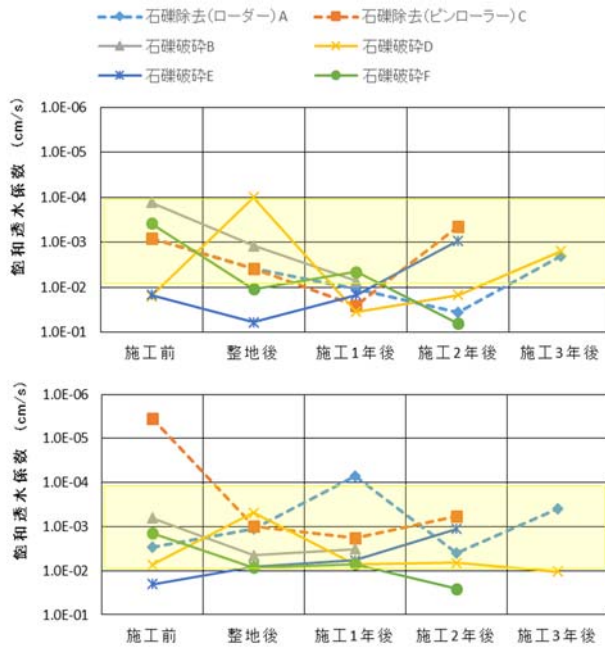


図-16 飽和透水係数

上段：石礫処理施工、下段：石礫破碎前後

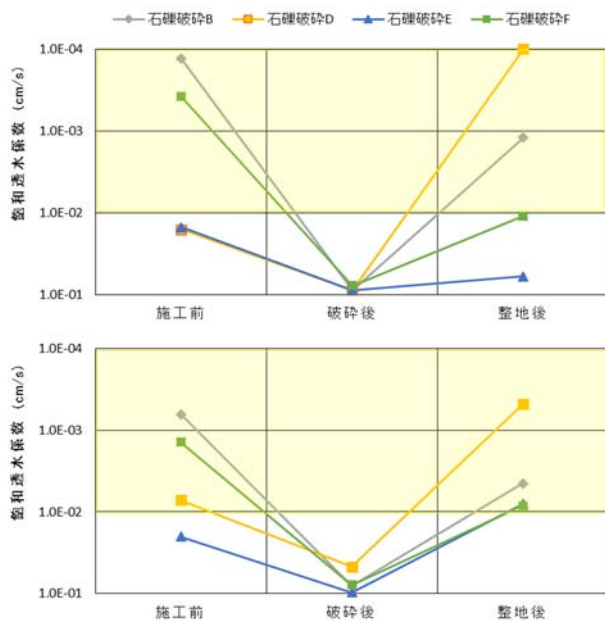


図-17 石礫破碎工施工前後の飽和透水係数

上段：Ap-1 層、下段：Ap-2 層

なっていた。施工前と整地後以降を比較すると、調査年により増減しているが、透水性が良すぎる F 圃場を除き、調査最終年度の飽和透水係数は適正値の範囲であった。

また、排水性の悪い B、C 及び F 圃場と排水性の良い A、D 及び E 圃場とで有意な差は確認されなかった。

3.7 畑地浸入能及び現場透水係数

図-18 に、各圃場の Ib を示す。

畑地浸入能は、単位時間あたりの浸入量で、水分が不飽和な土壌に対する透水性の指標となる²⁾。畑地浸入能は、給水からの時間経過とともに減り、3 時間程度で一定の値に落ち着く。畑地浸入能の変化率が、畑地浸入能の 10% となったときの値を Ib とする。アメリカでは、Ib が 7.6 mm hr^{-1} 以上あれば、うね間かんがいやボーダーかんがいを採用できないような深層浸透損失が大きい土壌と判断される²⁾。

石礫除去工を実施した A 及び C 圃場では、30mm 以上の礫が減少し、その分細粒分が増加することから、排水性の悪化を懸念していたが、整地後の Ib が大きくなり排水性が良くなっていた。

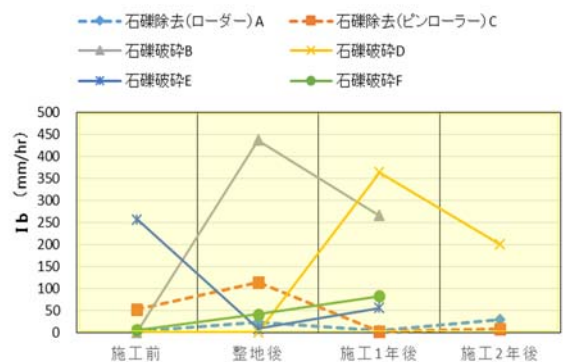


図-18 畑地浸入能

暗渠を整備している B 及び C、F 圃場でも、整地後、Ib が大きくなっており、施工により暗渠までの水みちがで、排水性が良くなったと推測できた。

石礫破碎工を実施した D、E 圃場は、整地後の Ib が施工前よりも小さかった。D 圃場は調査時期が遅かったため、土壌表層の夜間凍結とこね返しがあったこと、E 圃場は調査前日に 68mm の降雨があったことがその原因と考えられた。

図-19 に平成 27 年度と平成 28 年度に実施した現場透水試験(変水位法)の結果を示す。畑では排水性から透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s の範囲が適正とされている³⁾。

施工 1 年後以降の現場透水係数は、石礫除去工または石礫破碎工の実施圃場とも $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s の範囲にあり、

排水性は悪くなかった。

平成 27 年度と比較し、平成 28 年度の現場透水係数は全ての圃場で低下している。平成 28 年度の現地調査前に十勝地方では記録的な大雨が発生しており、その影響を受けた可能性も考えられる。石礫処理工法による違いは認められなかった。

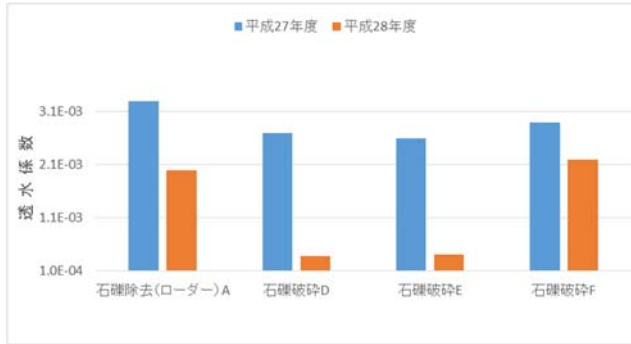


図-19 現場透水試験 (変水位法 H27、H28 年度)

3. 8 粒度分布

図-20 に石礫除去工で施工3年後までを調査した A 圃場、図-21 に施工2年後までを調査した C 圃場、図-22 に石礫破碎工で施工3年後までを調査した D 圃場、図-23、図-24 に施工2年後までを調査した E 及び F 圃場の地盤材

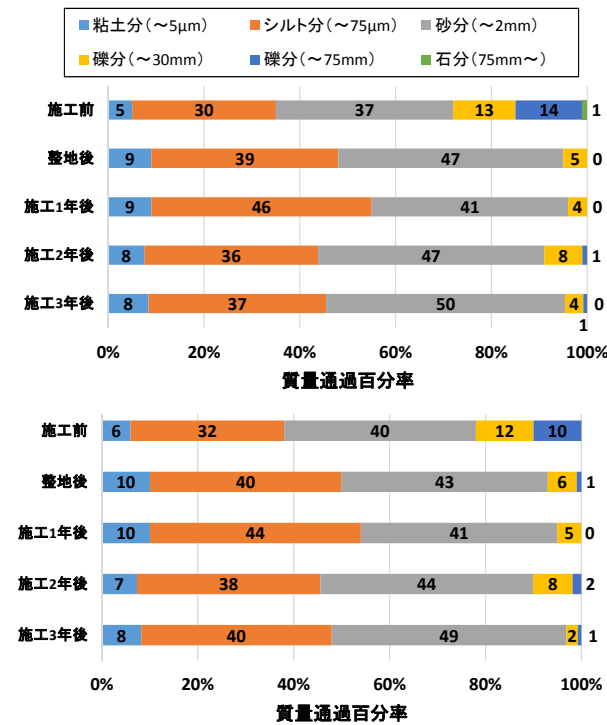


図-20 石礫除去工施工3年後までの粒度分布(A圃場 ローダー)
上段 : Ap-1 層、下段 : Ap-2 層

料の工学的分類に基づき粒径を区分した粒度分布を示す。なお、B 圃場は施工前含礫率が 1 % 以下であったため、粒度調査対象から除外した。

粒度分布は質量百分率で示されるため、図では質量割合に換算している。調査圃場の石礫処理対象粒径は 30mm 以

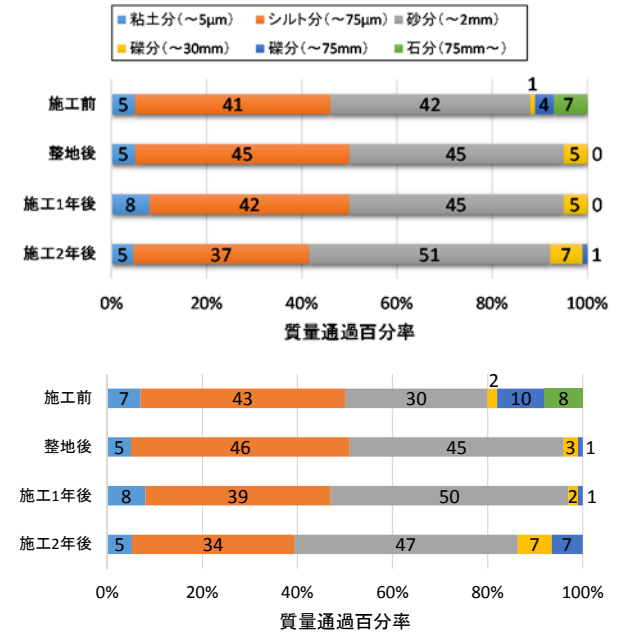


図-21 石礫除去工施工2年後までの粒度分布(C圃場 ピンローラー)
上段 : Ap-1 層、下段 : Ap-2 層

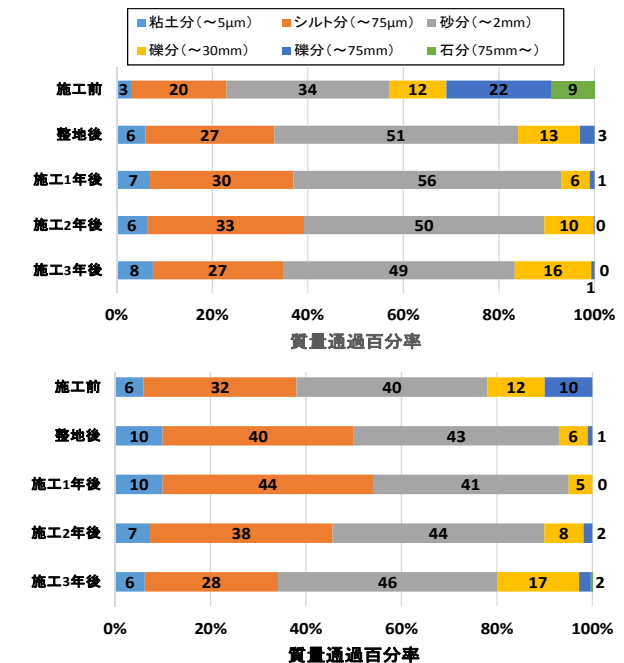


図-22 石礫破碎工施工3年後までの粒度分布(D圃場 クラッシャー)
上段 : Ap-1 層、下段 : Ap-2 層

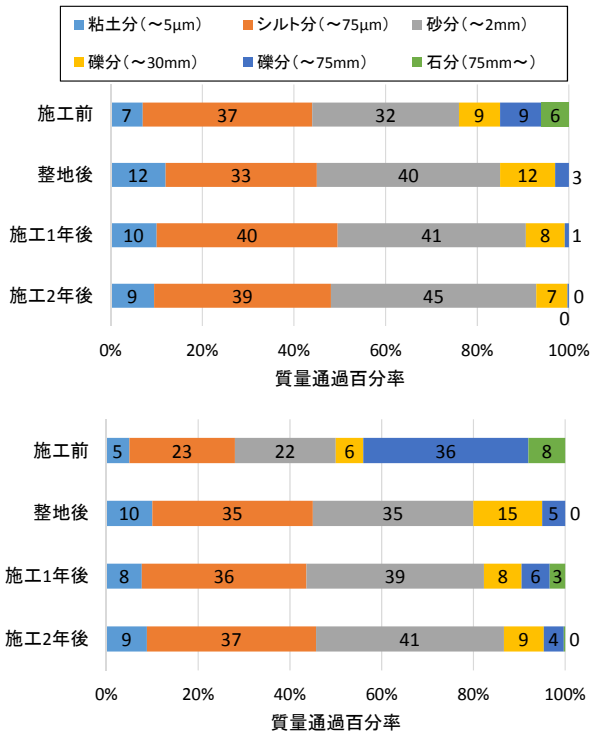


図-23 石礫破碎工施工2年後までの
粒度分布(E 圃場 クラッシャー)
上段 : Ap-1 層、下段 : Ap-2 層

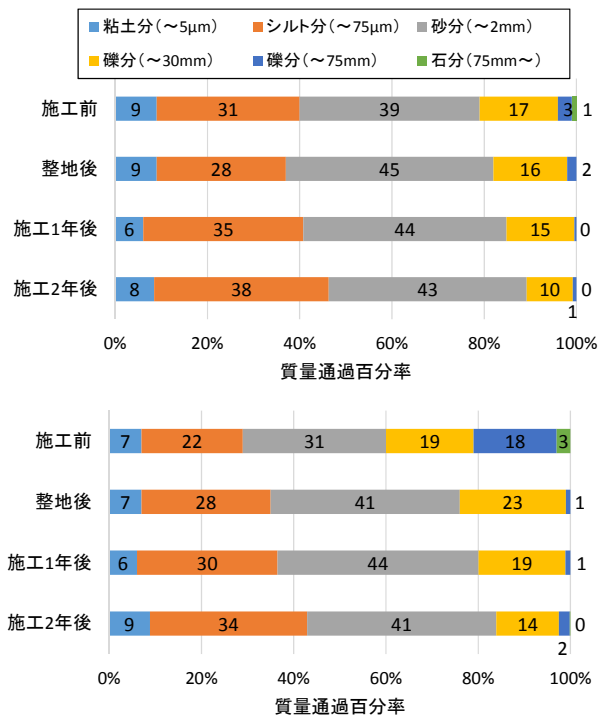


図-24 石礫破碎工施工2年後までの
粒度分布(F 圃場 クラッシャー)
上段 : Ap-1 層、下段 : Ap-2 層

上であり、石礫除去工では30mm以上の石礫を圃場外へ搬出し、石礫破碎工では30mm以上の石礫をストーンクラッシャーで30mm未満に破碎している。

なお、石礫処理工は表土30cmを確保するように施工されており、本調査では、調査年の作土層を粒度試験の対象としたことから、Ap-2層では石礫未処理部分を含んでいることがある。

石礫処理の対象である粒径30mm以上の施工前後の含有率(質量比)は、施工3年後までを調査した石礫除去工のA圃場と石礫破碎工のD圃場において、Ap-1層とAp-2層において施工前に10%から31%以上であったものが、整地後に0%から3%に減少し、施工から3年経過してもAp-1層及びAp-2層の各作土層の石礫の含有率は0%から1%であった。

また、施工2年後までを調査した石礫除去工のC圃場と石礫破碎工のE、F圃場のAp-1層とAp-2層では、施工前に4%から44%以上であったものが、整地後に0%から5%に減少し、施工後から2年経過してもAp-1層及びAp-2層の各作土層の石礫の含有率(質量比)は0%から6%であった。

現地で採取した石礫の比重を求め容積比に換算すると、施工2年後及び施工3年後の作土の石礫含有率は全て基準値の2%未満であった。

施工1年後のE圃場Ap-2層の石礫の含有率(質量比)が9%であったが、これは粒度調査の3点のうち1点の採土深が38cmで、石礫処理施工深30cmよりもかなり深く、この心土層の礫が混入した1点の数値(20%)が影響したものと考えられる。

同様に、施工2年後のC圃場Ap-2層の石礫含有率(質量比)が6%と、整地後、施工1年後の1%より大きくなったのは、採土深が36cmの1地点で心土層の礫が混入した数値(12%)が影響したものと考えられる。

石礫除去工及び石礫破碎工を実施した圃場では、施工1年後、施工2年後及び施工3年後において、両工法とも残存石礫含有率(容積比)2%以下とする石礫処理の施工基準を満たしていた。

3.9 全炭素含量

図-25に各圃場の全炭素含量を示す。

全ての圃場で、Ap-1層、Ap-2層の全炭素含量は、C層よりも多い。Ap-1層、Ap-2層は、C層と比較して有機物が多いことが分かる。

また、各圃場のAp-1層、Ap-2層の全炭素含量に有意な経年的変化は認められなかった。

圃場の排水性の違いによる差もなかった。

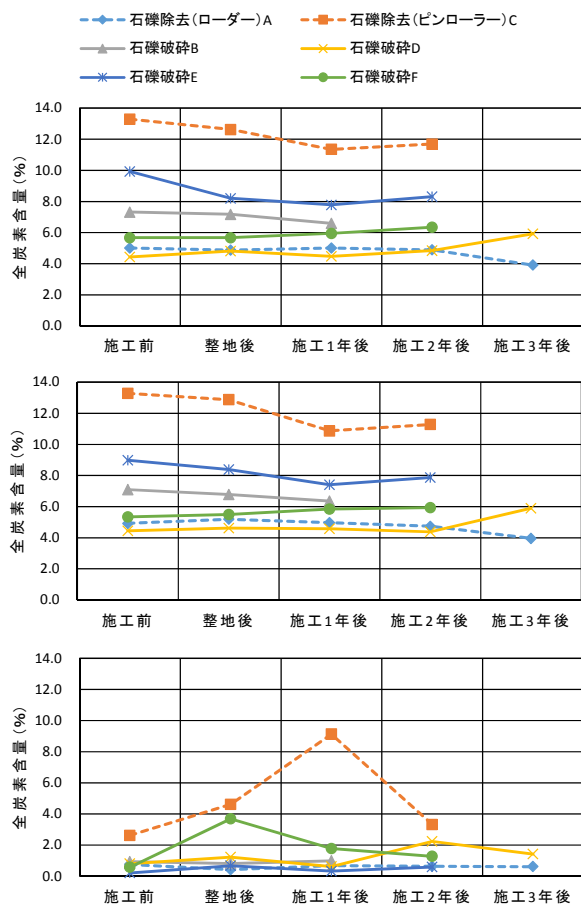


図-25 全炭素含量

上段：Ap-1層、中段：Ap-2層、下段：C層

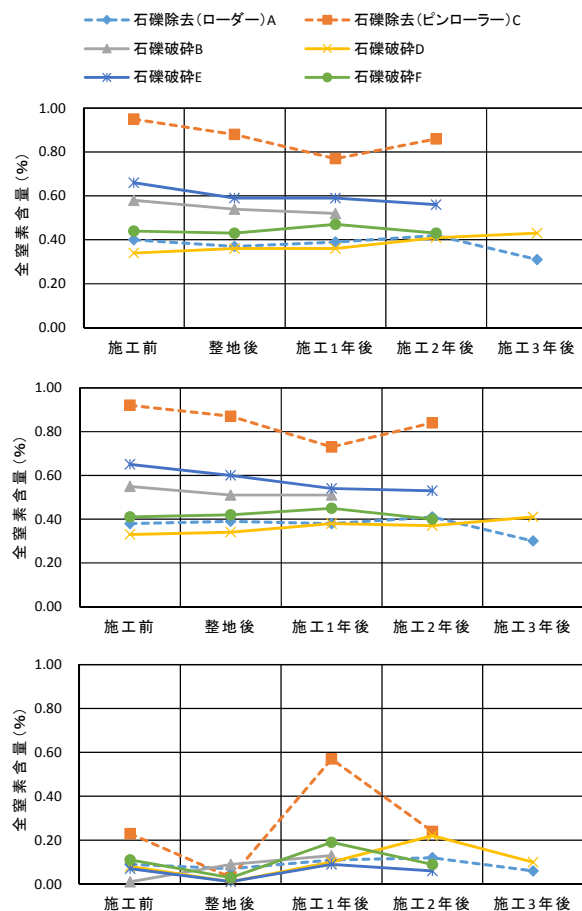


図-26 全窒素含量

上段：Ap-1層、中段：Ap-2層、下段：C層

3. 10 全窒素含量

図-26に各圃場の全窒素含量を示す。

全ての圃場で、Ap-1層、Ap-2層の窒素含量は、C層よりも多い。Ap-1層、Ap-2層は、C層と比較して窒素が多いことが分かる。

また、全炭素含量と同様に各圃場のAp-1層、Ap-2層の全窒素含量には、有意な経年的な変化は認められなかった。

全窒素含量も全炭素含量と同じく、圃場の排水性の違いによる差は認められなかった。

全炭素含量と同様の結果であった。

3. 11 保肥力 (CEC)

図-27に、各圃場の保肥力を示す。

石礫除去工法のA圃場、石礫破碎工法のE、F圃場において、Ap-1層、Ap-2層の保肥力は、C層よりも多い。

施工前の状況で各圃場の保肥力に違いがあるが、経年的な変化は特に認められなかった。全炭素含量、全窒素含量と同様の結果であった。

4. 石礫処理工法の適用条件の提示

石礫破碎工で破碎又は破碎されなかった礫の強度を確認するため、ポイントロード試験器により石礫点载荷試験を行った。対象礫数は43個である。

4. 1 石礫点载荷試験

図-28に、石礫点载荷試験結果を示す。

施工後とは石礫破碎工の実施直後に採取した礫、2年後とは、石礫破碎工の施工2年後の作付作物収穫後に粒度分布調査にて採取した石礫である。

石礫の状態を目視で確認し、無傷とは石礫表面に破碎や傷跡が認められないものである。かすりとは、石礫表面に石礫破碎工施工により傷が付いたと思われる傷跡及び小さな破碎面が認められたものである。破壊とは、石礫に打撃によると思われる明確な破壊跡が認められるものである。

文献⁵⁾の石礫含有率と作業速度と石礫圧縮強度のグラ

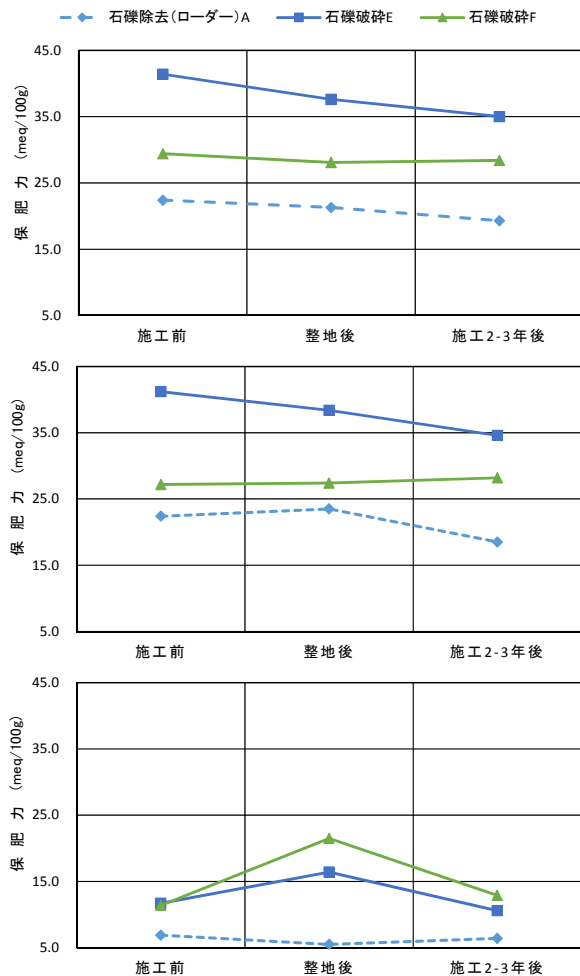


図-27 保肥力 (CEC)

上段 : Ap-1 層、中段 : Ap-2 層、下段 : C

フより、調査対象地区におけるストーンクラッシャーによる石礫破碎の対象石礫圧縮強度は、石礫破碎速度 4 m/min、平均石礫含有率 15%より、23MPa である。

石礫状態で無傷なものは、クラッシャーに破碎されなかった表土下層部等の石礫、又はクラッシャーに破碎されたが傷が一切付かなかったものと想定される。

かすりは、クラッシャーの打撃を受けたが、硬質なため傷が付いたが破碎にいたらなかった、破碎刃の当たり具合により石礫が刃から逃げる形になり破碎までに至らなかった、若しくは、表土下層部等の石礫でクラッシャーの破碎を受けなかったが、その後の営農作業で営農機械により打撃を受け傷が付いたことが想定される。

破壊は、クラッシャーによる打撃により石礫が破碎され砕けたが、砕け方により礫の一部が 30mm 以上の石礫として残存したものと想定される。

石礫点載荷試験の結果で、施工後は対象石礫圧縮強度 23MPa 以上の石礫比率が無傷、かすりで高く、破壊で低いことから、石礫破碎工の施工条件設定が石礫圧縮強度と関

係することが確認された。

無傷の石礫の硬質礫比率が施工後より 2 年後で低下したことは、経年営農作業により、石礫破碎対象深より深い表土下層部の礫が、表土上層部に移動してきたものと推定される。

同様に、かすりの石礫は、施工直後は硬質礫のみであったのが、施工 2 年後半分に低下したことも石礫破碎対象深より深い表土下層部の柔らかい礫が表土上層部に移動し、営農作業により礫に傷が付いたものと推定される。

破壊の硬質礫比率が施工後より 2 年後で低下したのは、施工後に表土内にあった無傷の軟質礫や、下層部より移動してきた軟質礫が、営農作業により破碎され、破壊の軟質礫比率が上昇したものと推定される。

上記から、除礫施工後の経年変化で、表土の礫率が上昇するのは、石礫対象厚より深層の表土下層部から礫が表土表層部に移動してきていると示唆される。

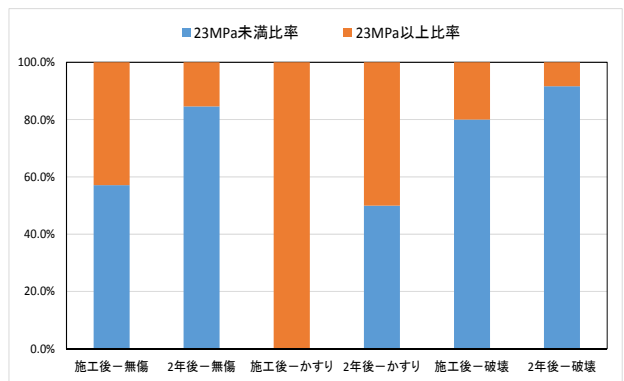


図-28 石礫点載荷試験 (石礫破碎施工後、施工 2 年後採取礫)

5. まとめ

表-5に、施工前を基準として整地後と各圃場の調査最終年となる施工 1 年後から施工 3 年後の測定値と、整地後の測定値の変化をまとめた。

石礫除去工及び石礫破碎工とも施工 2 年後及び施工 3 年後まで、圃場の過湿条件の違いも含め、石礫処理工法の違いによる作土層の土壌硬度や透水係数に大きな変化はみられなかった。

石礫除去工は石礫を作土層から排除し取り除くこと、石礫破碎工は砕いた石礫を作土層に戻すことから、透水性など物理的性質への影響の違いが想定されたが、両工法の施工 3 年後までの物理的性質に大きな違いはなかった。

石礫除去工及び石礫破碎工とも実施から 2 年後及び 3 年後までにおいて、作土層への 30mm 以上の礫の増加は

表-5 調査結果のまとめ

施工後の測定値の変化(施工前と調査最終年との比較)

項目	石礫除去工		石礫破碎工			
	A圃場 (暗渠なし・ ローダー)	C圃場 (既設暗渠・ ピンローラ)	B圃場 (暗渠あり・ クラッシャー)	D圃場 (暗渠なし・ クラッシャー)	E圃場 (暗渠なし・ クラッシャー)	F圃場 (暗渠あり・ クラッシャー)
調査最終年	施工3年後	施工2年後	施工1年後	施工3年後	施工2年後	施工2年後
土壌の排水性	良い	悪い	悪い	良い	良い	悪い
表土厚	増加	増加	増加	増加	減少	増加
土壌硬度	耕盤層なし	耕盤層なし	耕盤層なし	耕盤層なし	耕盤層なし	耕盤層なし
乾燥密度	ほぼ同じ	減少	減少	増加	増加	減少
固相率	増加	減少	減少	増加	増加	減少
全孔隙量	減少	減少	増加	減少	減少	増加
粗孔隙量	減少	増加	増加	減少	減少	増加
易有効水分量	同じ:適正	増加:適正	増加:適正	減少:やや低い	減少:やや低い	増加:やや低い
飽和透水係数	適正	適正	適正	適正	適正	大きい
畑地浸入能	排水良い	排水良い	排水良い	排水良い	排水良い	排水良い
現場透水係数	排水良い:適正	排水良い:適正	排水良い:適正	排水良い:適正	排水良い:適正	排水良い:適正
30mm以上の礫量	減少:適正	減少:適正	変化なし:適正	減少:適正	減少:適正	減少:適正
全炭素含量	減少	減少	増加	増加	減少	増加
全窒素含量	減少	減少	変化なし	増加	減少	変化なし
保肥力	減少	—	—	—	減少	変化なし

※) 土壌の排水性は、暗渠施工の有無で判定。B、C、F圃場は暗渠施工、A、D、E暗渠不施工圃場である。

整地後の測定値の変化(施工前と整地後の比較)

項目	石礫除去工		石礫破碎工			
	A圃場 (暗渠なし・ ローダー)	C圃場 (既設暗渠・ ピンローラ)	B圃場 (暗渠あり・ クラッシャー)	D圃場 (暗渠なし・ クラッシャー)	E圃場 (暗渠なし・ クラッシャー)	F圃場 (暗渠あり・ クラッシャー)
表土厚	増加	増加	増加	増加	減少	減少
土壌硬度	耕盤層なし	耕盤層なし	耕盤層なし	耕盤層なし	耕盤層なし	耕盤層なし
乾燥密度	減少	減少	減少	増加	減少	—
固相率	減少	減少	減少	増加	減少	減少
全孔隙量	増加	増加	増加	減少	減少	増加
粗孔隙量	増加	増加	増加	減少	増加	増加
易有効水分量	増加:適正	増加:適正	増加:適正	減少:低い	減少:低い	増加:低い
飽和透水係数	適正	適正	適正	適正	適正	適正
畑地浸入能	排水良い	排水良い	排水良い	排水悪い	排水良い	排水良い
30mm以上の礫量	減少	減少	変化なし	減少	減少	減少
全炭素含量	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	減少	変化なし
全窒素含量	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	減少	変化なし

※) B圃場の施工前30mm以上の礫量は極小であった。

顕著ではなく、石礫処理の施工基準を満たしていた。

また、石礫破碎工において、石礫破碎後の膨軟になった作土層に締固め効果のある整地工を行うことは、営農機械走行のための地耐力の回復と適正な透水性確保に有効であることが認められた。

石礫除去工及び石礫破碎工の施工前と整地後、施工2年後及び施工3年後では、全炭素含量、全窒素含量及び保肥力(CEC)に石礫処理工法の違いによる変化は認められなかった。

また、石礫破碎工の適用に関して、除礫対象の石礫圧縮強度を把握し、圃場の石礫含有率より対象石礫破碎の作業速度を確認して経済的に石礫破碎工法が適切かを判断すべきである。

参考文献

- 1) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構農業研究本部(2012):土壌・作物栄養診断のための分析法2012, PP13-25.

- 2) 北海道開発局土木試験所土壤保全研究室・農業水産部農業調査課(1984年)：畑地かんがい計画のための土壤調査法, PP36-52.
- 3) 北海道農政部 (2010)：北海道施肥ガイド2010, p. 34.
- 4) 藤原俊六郎他 (2010)：新版土壤肥料用語事典第2版, p. 55.
- 5) 細川吉晴他(1998)：石多発地帯における農用地整備のための連続石礫破碎工法、農業土木学会誌、第66巻

Study on the Evaluation of Soil Improved by Gravel Processing

Research budget: Grants for operating expenses (general account)

Duration of research: FY 2013-2016

Research team: Rural Resources Conservation Research Team, Cold-Region Agricultural Development Research Group

Authors: YOKOHAMA Mitsuhiro, YAMAMOTO Hiroki, KUWABARA Jun

Abstract

Gravel found on farmlands often interferes with farm operations. To address this issue, gravel is processed in government-operated farmland consolidation projects with the aim of improving the particle size distribution of farmland soil. Recently, gravel is processed by methods such as conventional gravel removal by stone loader from plowed soil and the crushing of gravel. However, neither method achieves clear changes in the physical properties of soil (e.g., hydraulic conductivity, water retention). In selecting an effective method for processing gravel in the soil, it is important to propose the conditions under which each processing method can be applied by taking account of the change in the physical properties of soil. This study aims to accumulate the findings on improvement of physical properties of soil through two stone gravel processing methods; and based on those findings, it also intends to propose the conditions under which each gravel processing method can be applied.

From FY 2013 to 2016, the authors sampled soil from farmland that had undergone gravel removal or crushing before gravel processing, after grading and one, two or three years after gravel processing, and we examined the physical properties of each soil. The physical properties of the soil were all found to be favorable, regardless of the processing method or sampling time. It was also found that, after gravel crushing, the compaction of processed soil that has become soft and porous from ground leveling is effective for ensuring the driveability of farming vehicles and that it is vital to understand the compressive stress of gravel in order to adopt the execution of crushing.

Key words: gravel, stone loader, stone crusher, gravel content, hydraulic conductivity