

農地保全の研究

第 31 号



農業土木技術者継続教育機構認定プログラム

平成22年10月7日

農業農村工学会 農地保全研究部会

巻頭言

農業農村工学会農地保全研究部会第31回研究集会

「持続的農業のための農地保全」

の開催にあたって

この農地保全研究部会の第1回研究集会は、昭和55(1980)年6月13日に滋賀県草津市において開催され、主題は「農地保全と水食」とされました。以来、中山間地問題、農地の多面的機能問題、農村景観形成問題、農村空間問題・・・と時代背景に照らされながら、農地保全に関わる多くの問題に取り組み、その解決法を求めてきました。

そして本年、平成22(2010)年10月7日、関東地方管内でも農業農村整備事業にとって主要な地域である群馬県前橋市において、第31回集会を開催することになりました。

今年の研究集会では、「持続的農業のための農地保全」をメインテーマに掲げました。このテーマは、非常にオーソドックであり、かなり古典的な話題と考えております。その意味でもとくに中山間地における農地保全、地域資源の活用に関する基礎的・応用的知識の向上をはかることをねらいにしております。

個々のテーマとしては「傾斜畑の土壤保全、農地防災事業、嬭恋村の農地造成、関東ローム土壤、土壤侵食の広域推定およびUSLE関連」など、いずれも土壤特性、農地造成と土壤侵食および保全対策などをメインテーマに即した6つの話題が用意されました。

さらに、講演が終了後に総合討論として講師陣と聴講者との間で意見交換も行います。

なお、研究集会に続く現地研修会は、群馬県西部に位置する吾妻郡嬭恋村を中心とする高原キャベツの一大産地で行います。現地研修に先立ち嬭恋村村長の熊川栄様による講演が用意されております。とくに今年は春からの異常気象の影響により各地で野菜生産量が減少し、消費者にとっても野菜の高価格問題など、あらためて農業生産と自然環境とくに気象要因の大きさを強く感じられました。

嬭恋村では昭和に入ってから農家戸別、団体営、県営および国営による農地造成が積極的に行われ、東京などの首都圏の夏季キャベツの大産地として大きな比重を占めております。その反面、キャベツの単作、大規模機械化農業の推進による土壤侵食問題とそのため農地保全対策が大きな課題として浮かびあがっております。その意味で、今回のテーマの意味することがあると思われまます。

一方、最も話題性の高い1つとして八ツ場ダムがあります。あまりにも政治的な話題のためここでは議論しませんが、嬭恋地域の農業保全とダム建設は非常に大きい関連性があります。すなわち、嬭恋からの土壤侵食、土壤流亡による下流への影響です。

いずれにしても今回の研究集会および現地研修会を通して改めて「農業生産のための農地造成（オフense）と土壤侵食対応のための農地保全（ディフェンス）」に関して、多くの参加者が積極的に議論されることを期待いたします。

今回この地におきまして、当研究集会を開催するにあたり、多くのみなさまのご尽力を賜りました。とりわけ、農林水産省関東農政局、群馬県、水土里ネット群馬、嬭恋村および東京農業大学の関係各位に御礼申し上げます。

加えて、ご多忙にもかかわらずご講演を快く引き受けられ原稿の執筆に応じていただきました、岐阜大学応用生物科学部の松本康夫先生、農林水産省農村振興局計画部の佐藤具輝様、嬭恋村村長の熊川 栄様、三重大学大学院生物資源学研究科の成岡 市先生、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所の塩野隆弘様、東京大学大学院農学生命科学研究科の西村 拓先生のみなさまにお礼申し上げます。

結びに、当研究部会幹事会を代表いたしまして、研究集会にお集まりいただきました多くのみなさま方に、心より深く感謝申し上げます。

平成 22 年 10 月 7 日

農業農村工学会 農地保全研究部会

部会長 駒村正治

<http://www.jsidre.or.jp/bukai/nouchihozen/>

持続的農業のための農地保全

目次

基調講演

「傾斜畑の土壌保全」	松本康夫（岐阜大学）	・・・・・・・・・・1
------------	------------	-------------

情勢報告 1

「農地防災事業について」	佐藤具揮（農林水産省農村振興局）	・・・・・・・・・・9
--------------	------------------	-------------

情勢報告 2

「孺恋村の農地造成と保全」	熊川 栄（孺恋村村長）	・・・・・・・・・・13
---------------	-------------	--------------

講演 1

「畑作に強い関東ローム表層土壌の基本的物理性と固相構造」	成岡 市（三重大学）	・・・・・・・・19
------------------------------	------------	------------

講演 2

「土壌侵食の広域推定および土砂流出対策」	塩野隆弘（農村工学研究所）	・・・・・・・・27
----------------------	---------------	------------

講演 3

「USLE に含まれない土の性質と土壌流亡」	西村 拓（東京大学）	・・・・・・・・39
------------------------	------------	------------

農地保全研究部会誌「農地保全の研究」あゆみ	・・・・・・・・50
-----------------------	------------

農業農村工学会 農地保全研究部会規約	・・・・・・・・52
--------------------	------------

平成 22 年度農地保全研究部会幹事	・・・・・・・・53
--------------------	------------

[復刻] 傾斜畑の土壌保全

岐阜大学応用生物科学部 松本 康夫

I. はじめに

中山間地域の持続的傾斜地農業が問われてきた。とくに特産地を形成している畑作地帯では、長大な斜面で機械化・単作農業が中心であり、省力的営農形態が経営を支えてきた。ところが、長年にわたる農地開発に伴って農地保全のあり方が改めて問題になっている。圃場内の土壌劣化や連作障害に始まり、圃場境界線や溪流などの土砂洗掘と堆砂、裸地状態の耕作放棄地の介在、近年では、河川水質の保全に対する下流住民の高度な要求が高まってきた。

古来から、土壌侵食は上流（水源地帯）と下流（都市・平野域）の対立をもたらす現象として顕在化しながら（佐藤，1995）、開発に伴う一過性の問題として扱われる側面が強かった。最近の環境意識の高揚は、継続的な保全対策を促し、放置すれば傾斜地農業の存続を脅かすとともに、衰退しかねない危機すらはらんでいる。改めて、わが国の土壌侵食の特質を探り、農地保全を基軸とした総合的な畑地帯整備が図られなければならない。

本稿では、筆者が行ってきた現地調査をもとに、基本的な土壌侵食現象の特性を明らかにして、今後の土壌保全の課題を展望することとした（松本，1998）。

II. 土壌侵食の起こり方

幅 5m、長さ 40m、勾配 7° の砂質土からなる裸地斜面において、散水試験と降雨下で土壌侵食の進行状況を調べた（松本ら，1978）。雨が強くなるにつれて、斜面内部に局所的な浅い湛水域が現れ、次第に下流に向かって広がりながら、一ヶ所に集中する流れとなって、急激にガリができた。流れ出た土砂は、わずかな水流で運びきれないので、やや下流で広がり、水勢が弱まって一時的な堆砂域を形成した。このようなガリと堆砂域が対になって現れ、降雨が継続すると、それぞれの堆砂域を起点として上方に向かって深くなりながら伸長し、下流側のガリから、順次、上部の堆砂域を貫いて連絡するようになった。ガリは、表流水の多い下流ほど長く、深いものであった。

マサ土からなる開畑地でガリ発達の様子を調べると、以前より一層強い降雨を受けた時に急激に発達する特性（免疫性）を示し、100m、5° 程度の斜面でも上下流に連絡した一本のガリになるのは、短期間（降雨期では約3ヶ月）である。10分間に10mmの雨が2～3回降れば、ほぼ連絡した形態になっている。また、ガリの形態は、斜面勾配やわずかな起伏（耕起跡や畝）、土層の透水性によって異なる。起伏の少ない斜面であれば、ガリの発生密度は斜面の勾配と密接な関係がある。起伏があると、傾斜方向か、等高線方向かによって形態が異なる。傾斜方向の場合に比べ等高線方向の場合の方が流れは緩やかである。ところが、強い雨にあうと、溝（畝間）に貯溜された雨水が溢れるようになり、ダムの決

壊のごとく、規模の大きなガリを生じ、連鎖的に下流に波及して、大きなガリと堆砂域が交互に現れ、斜面上方や溝（畝間）に向かって枝ガリが発生する。ガリは免疫性を獲得して発達に長期間を要する。傾斜方向の場合、溝ごとに小さなガリが発生し、降雨履歴に左右されながら発達する。一方、ガリが安定化に向かうのは、短い斜面ほど早い。長くなるにつれて、斜面の途中で堆砂域や相対的にガリの浅い部分（堆砂域の痕跡）が残るようになり、発達を遅らせるためである。ただ集水域が大きいため流出水が増えるので、ガリは中流部で最も深く、下流の堆砂域に向かって幅の広いものになる。

また、斜面の下端に固定した施設がなく、しかも堆砂が起こらない場合、図-1に示したように流末の処理状況が急勾配の排水溝に直接注ぐような場合は、排水溝が人為的なガリであるため、上部の斜面に波及して規模を増し、発達を早める。緩やかな場合には、ガリの流末地点で堆砂域ができ、堆砂間でシルトが沈積して湛水するようになり畦畔があれば崩壊しやすい。流末に沿って堆砂が均され、流れが安定化するような畦畔が最も望ましい。

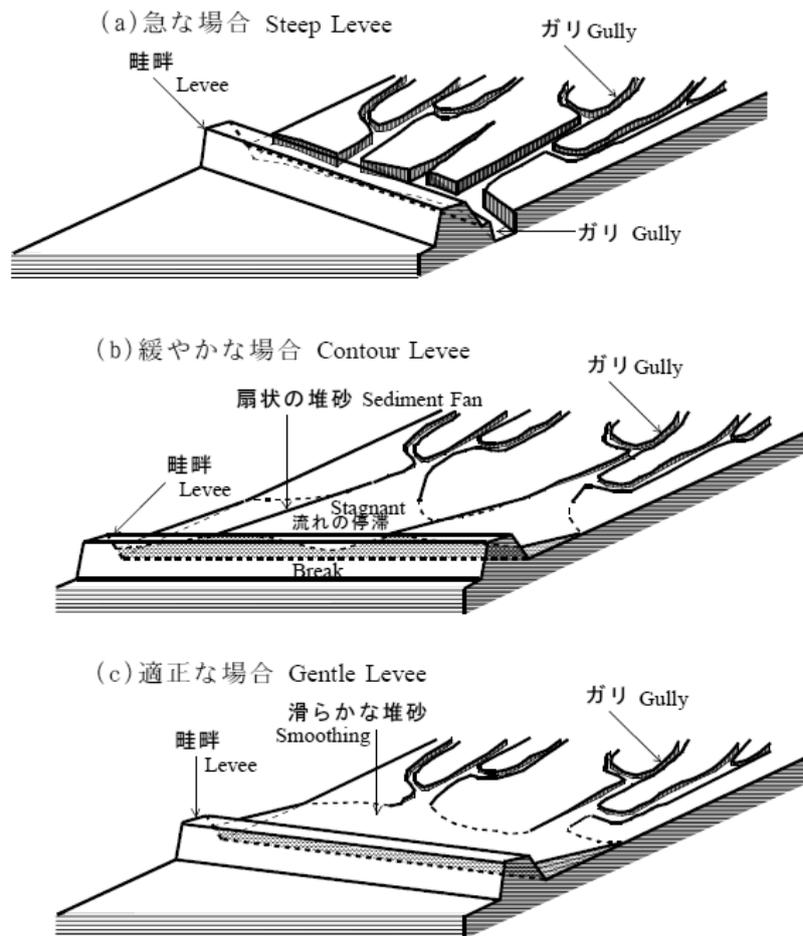


図-1 流末処理による侵食形態の違い
Fig.1 Gullying on the Fields of different Flowend Treatment

流末の堆砂をコントロールできることが保全工法として具備すべき条件である。この保全工法が仮畦畔工として提案された（松本，1981）。

Ⅲ. 耕作形態と侵食特性

高原高冷地の立地条件を活かし，夏大根の産地形成が進められている傾斜畑地帯において耕作形態を通して土壌の侵食特性を解明した（松本ら，1995）。本地域は，固結した火山灰の中に転石状に火山礫を挟む第四紀洪積層に覆われている。圃場形態を整理するとともに畝立・排水状況，土壌侵食状況を精査した。また，畝の方向や組み合わせなどの耕作形態についてはラジコン飛行機を使って航空写真を撮影した。さらに，土壌流亡量を概算するため土壌侵食の痕跡を追跡して侵食規模を実測した。大根畑の勾配は，2～7° にわたり，斜面長はほぼ 30～100m に集中する。勾配が大きくなると斜面長を短く抑え，逆に勾配が小さくなると斜面長が長くなっても支障のないように開墾され，斜面長及び勾配は，平均 60m と 4.5° であった。

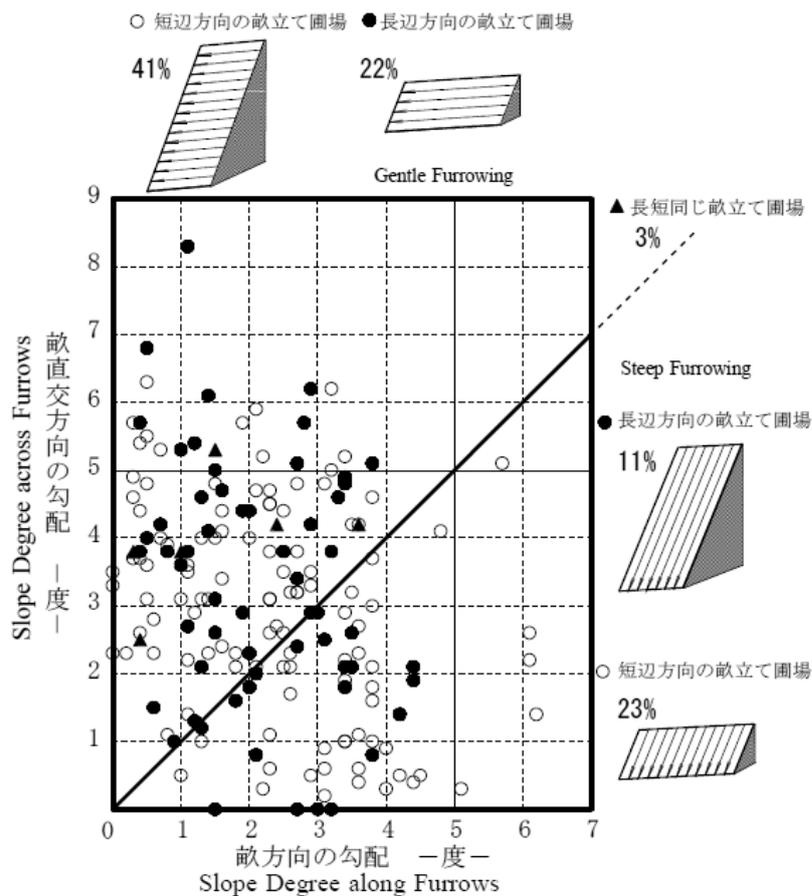


図-2 畝立て方向と圃場形態の関係
Fig.2 Furrowing Practices on Test Fields

1. 耕作形態

圃場の畝方向を調べると、**図-2**に示したように耕起作業の容易な圃場境界線に沿った畝立て長短同じ畝立て圃場が多く、しかも短辺方向に沿った畝が6割以上を占めた。斜面の長い圃場ほど、短辺方向に畝を立てる傾向がある。畝立て形態を分類すると、全て同一方向が約6割、圃場の上下流側に2~3本の枕畝を立てた圃場が3割であった。畝の方向をほぼ等高線方向にしたり、途中から方向を変えたり、畝を途中で切り欠いた圃場もみられた。畝を立てる際に傾斜の強い方向を選んだ圃場は約3割、傾斜の緩い方向は約6割であった。畝方向の勾配はほぼ5°以下で畝長は20~80mに抑えられ、勾配が大きくなるにつれて畝を短くする傾向が認められた。

2. 畝立て方向と侵食特性

侵食形態を整理すると、圃場境界線に沿って発生したガリ侵食（タイプⅠ）、法面に一定の間隔でできた筋状侵食（タイプⅡ）、圃場流末部の法面崩壊（タイプⅢ）の3つの形態に大別できた。タイプⅠの侵食を招いた圃場は畝を緩傾斜方向に立てたものが多く、圃場からの排水が畝間流末の境界線に沿って急勾配で流れたためである。タイプⅡの法面侵食は、圃場から畝間を伝って直接法面に排水された場合に該当し、畝を短辺方向で急勾配方向に立てている圃場が多く、早急な排水が優先されたためである。タイプⅢの法面崩壊は枕畝や承水溝によって、圃場の流末地点に多量の排水が集中し法面に流れ込んだためであり、畝間から排水が1カ所に集まり侵食規模が大きくなったものである。侵食痕跡から土壤流亡量を試算してみると、タイプⅠのガリ侵食は約85%を占め、タイプⅡの法面侵食は約5%、タイプⅢの法面崩壊は約10%であり、圃場境界のガリ侵食が土壤流亡の主要な供給源であることが明らかになった（松本ら、1995）。

IV. 総合保全対策の展開方向

1. 農地基盤の課題

土壤流亡に関係する農地基盤上の課題を整理すると、次の5つの側面があげられる。

- (1) 圃場形態：農家は畝によって傾斜を緩和し、畝の長さを抑えているが、不整形であるために作業性を犠牲にせざるを得ない。作業性や排水を考慮して流末境界線を適正な勾配で設定し、保全性の高い耕作形態を誘導するよう圃場形態を整えることが肝要である。
- (2) 道路：道路の連絡が不十分で袋小路になっている所が少ない。このような道路が寸断されると、農作業や圃場の保全管理に支障をきたす。構造上、排水が流れ込むところがあり、轍跡が深掘れして通行に支障をきたしている。道路側溝を整え、舗装が望まれる。
- (3) 排水路：耕作形態を考えながら圃場境界線に承水路を配置し、溢水することのない系統的な集水路が求められる。圃場排水は、土砂を含んで短時間（10~30分間）の

降雨強度に左右されるので、水路の水理計算にあたっては検討を要する。

- (4) 土砂溜：土砂溜は圃場や法面から流亡した粗粒土が溪流や河川に流出するのを抑制する。一時的に傾斜の緩い水路や溪流に土砂が溜まり、その後、2次移動するものも少なくない。水路内の堆砂は溢水の危険性を増し、攪拌されて懸濁が長期化する原因にもなる。排水路に沿って、一部を掘り下げたり膨らませて遊水空間をつくり、土砂溜として活用する工夫が必要である。雨水に懸濁して流出する細粒土については、滞留時間の長い沈砂池が必要であるが、懸濁水の流出が長期化する危惧がある。しかも、洪水を吸収できる容量をもった沈砂池は、用地や工事費等から期待できない。分散的な土砂溜が望まれる。
- (5) 土層構造：下層に難透水性の硬基盤が広がり、雨水が浸透しにくいために表土が飽和しやすく流れやすい。基本的に流亡を遅らせる土層改良が必要である。雨水浸透を促進し、土壌が飽和しにくいよう心土破碎や深耕を行ったり、暗渠を敷設する。

2. 営農面の課題

農家は、畝立てや畝間の敷草によって畑面の侵食を抑制し、枕地に枕畝を設けたり、承水溝を掘って、土壌流亡を抑制している。排水溝をビニールで被覆したり、洗掘部に肥料袋を土嚢代わりに投入したり、トタン板によるシュート水路、塩ビ管の集水路やU字溝を設置したり、丸太や板柵で圃場下端を補強したり、板柵で簡易な土砂溜を作るなど、土壌が流れるのを抑制する多様な工夫がみられる。一方で、農作業の効率や排水を重視し、土壌流亡を避けられない圃場がみられる。保全管理の精粗が錯綜、混在しているのが現状であり、営農面からの課題も少なくない。多様な保全管理の工夫例を農家に紹介しながら、積極的に活用してもらうよう啓蒙する必要がある。

営農面からみた課題を整理すると、次のように4つの側面があげられる。

- (1) 耕地分散：耕地の分散は、通作に費やす負担を増し、畑面の監視が行き届かなくなり、保全管理の粗放化を助長する。適時に適切な保全作業が軽視されがちになる。
- (2) 畑面利用：農家心理から畑面を全面にわたって植栽に供するため、圃場の周辺に土砂を滞留させる場所がない。畝間から法面に排水して法面侵食を招いたり、耕耘時に土壌が落下、散乱して降雨とともに流亡しやすい。畝間流末部に、草生帯や堆砂帯を配置する。
- (3) 連作障害：畑作物を連作する限り避けられない。土壌消毒が慣行になっているが、農薬の多投による土壌構造の劣化は、透水性を低下させ、表土の細粒化を助長する。また、汚染された土壌を流したいという農家の潜在的な耕作形態を生んでいる(松本, 1992)。牧草輪作体系を組入れて、土壌の肥培管理につなげる必要がある。薬害に対する安全性や環境汚染、食品安全性に対しても危惧がある。
- (4) 土壌構造：排水や作業性が優先され、表土を心土から補う心土耕作に移行しがちである。連作障害対策を含めた長期的な視点から有機質肥料による肥培管理を行い、土

壤構造の維持改善を図る必要がある。ただ、肥培管理によっては、土壌の沈澱凝集を妨げ、土壌懸濁を助長することがある。今後の肥培管理方法を検討することが早急に求められる。

3. 造成・整備工法の総括的検討

耕作形態を想定しながら排水と土壌保全を両立する圃場形態を模索し、農家が保全管理しやすいように支援しなければならない。造成・整備工法は“発生源対策”にかない、貴重な土壌が流亡しない圃場形態に整えることが理想である。開畑にあたっては、施設化の意向が強く、農作業を容易にするよう緩傾斜の圃場が造成される方向にある。畑面の土壌流亡は軽減される反面、排水が停滞し、継続すると流末部の排水が増える。排水溝や法面の増加に伴って洗掘・崩壊が懸念される。排水溝や法面の保護、早期緑化が緊急の課題であるが、管理しやすい広幅草生水路や法面小段等を挿入したい。また、造成工事の段階で地表排水組織とともに土層改良や暗渠排水を組み込みたい。

次に、造成・整備工法は、土壌流出を抑制できる“排水形態”がとれるものでなければならない。道路や排水路は区画配置に規定されるが、排水路と堆砂ポケット（土砂溜）を系統的に配置することが重要である。また、地区外の溪流や排水路に問題を残すことが多い。下流の溪流や排水路を含めて畑地保全対策の一貫として組み入れ、改修を図ることが肝要である。道路網は、分散錯圃による保全管理の粗放化を防ぐためにも、豪雨時に寸断されたり洗掘されないよう路面舗装を図りたい。通常は道路として利用でき、降雨時には排水路として機能する水兼道路についても一考の余地がある。また、農家の緻密な保全管理を支援するために、新たな開畑によって圃場の集団化が進むよう期待したい。

一方、土壌流亡に伴う懸濁水は、多量で短時間に集中する傾向がある。集中した懸濁水を清澄な流水に戻すには多大な施設と経費を要する。小規模でよいから、できる限り堆砂ポケットを分散的に配置して流出を遅らせ、堆砂層等を活用して濾過・沈降処理することが望まれる。許されるならば林内に懸濁水を導いて放流してもよい。林内には豊富な腐食層のフィルタが備わっており、回復力も大きい。林内放流が無理であれば、適所に林地表土を残した浅い土砂溜やグリーンベルトを残し、排水路の途中に配置してもよい。

今後とも、机上の空論でなく実証的な視点から課題の整理と問題点の分析が必要である。さらに、営農指導や輪作体系への移行など、営農面を取り入れた総合的視点から継続的に畑地の保全対策に取り組むことが重要である。

引用文献

- 1) 佐藤常雄・大石慎三郎(1995)：貧農史観を見直す，pp.26-41，講談社
- 2) 松本康夫（1998）：高原畑における土壌侵食と保全課題，農地保全の研究，19，pp.3-16

- 3) 松本康夫・丸山利輔・長堀金造・高橋強・今尾昭夫・福桜盛一(1978)：ガリ発達の過程と流亡土砂量，農土論集，77，pp.53-60
- 4) 松本康夫(1981)：仮ケイハンの滞砂機能について，農土論集，91，pp.42-50
- 5) 松本康夫(1992)：クロボク土からなる傾斜畑の耕地利用形態と土壤保全対策，土壤の物理性，66，pp.55-63
- 6) 松本康夫・天谷孝夫・西村直正(1995)：高原洪積畑地帯における圃場利用形態と土壤侵食特性，土壤の物理性，71，pp.23-29

著者紹介

松本康夫 (まつもと やすお)



経歴

昭和 25 年	岡山県に生まれる
昭和 49 年	京都大学大学院修士課程修了 岐阜大学助手
平成 5 年より	岐阜大学応用生物科学部 教授

農地防災事業について

農林水産省農村振興局 佐藤 具揮

I. 高まる被災リスク

近年、ゲリラ豪雨・台風の増加や大規模な地震の発生に伴い、甚大な自然災害が頻発しています。このため、農地の湛水被害、農地地すべり、ため池決壊などの農業被害の災害リスクが高まってきています。

II. 農地防災事業の概要

農地防災事業では、こうした被災リスクに対応して、食料の安定供給を支える基盤である農地・農業用施設等に対する自然災害を未然に防止し、農業生産の維持及び農業経営の安定を図るとともに、国土保全、地域住民のいのちや暮らしの安全の確保に貢献する事業を実施しています。

【主な事業】

① 排水施設の整備

流域の開発等によって、雨水が流れ出す状況に変化が生じ、湛水被害が頻発している地域において、排水施設を整備することにより、農用地の被害を防止するとともに、宅地等の浸水も防止します。

② 地すべりの防止

地すべりによる農地等の被災を防止し、国土の保全と安全な生活環境を実現します。

③ ため池の改修

老朽化したため池を整備することにより、決壊や崩壊を防ぎ、下流の農用地を守るとともに、宅地や公共用施設の被害も防止します。

III. 事業効果

1. マクロの効果

地球温暖化に伴う気候変動の影響などにより、大雨の頻度が増加し、災害リスクが高まっている一方、農地防災事業などにより農地・農業用施設の整備が進展する中、農地・農業用施設の被害額は着実に減少してきており、昭和 30 年以前の 3,000 億円台から平成に入ってからでは 1,000 億円台に減少しています。

2. ため池事業の効果

ため池は、降水量が少なく、流域の大きな河川に恵まれない地域などで、新田開発や用水不足解消を目的に、長い歴史の中で築造されてきたものです。現在、全国で約 21 万箇所

あるため池のうち、受益面積が2haを超える規模の大きなものは約6万4千箇所あり、全国の水田の約4割、約120万haの水田を潤し、現在も貴重な水源としての役割を果たしています。

一方、規模の大きなため池の約4分の3が江戸時代以前に築造され、ひとたび決壊すると農地はもとより、家屋等にも大きな被害を及ぼすおそれがあります。平成16年豪雨の際には、全国で2千6百箇所を上回るため池が被災し、とくに兵庫県淡路島では181箇所のため池が決壊し、人命・人家や公共施設に大きな被害が出ました。

ため池等整備事業では、老朽化が進んでいるため池を改修し、農業用水を安定的に確保するとともに、決壊等による災害の未然防止を図ってきており、これまでに規模の大きなものを中心に全国で約1万3千箇所を改修してきています。

直近の10ヶ年で見ると、約2千1百箇所のため池を改修し、農地6万4千haへの農業用水の安定供給を確保するとともに、下流の農地6万8千ha及び農村への災害を未然に防止しました。

ため池は、降雨の少ない地域等に数多く分布し、集中豪雨や地震等により突発的に大きな被害が生ずるおそれがあることから、各地域が、決壊のおそれがあるなど緊急性の高いため池整備を行う場合には、国が支援する必要があると考えています。

3. 湛水防除事業の効果

我が国は、年間を通して降雨量が多く、台風の常襲地帯となっており、加えて、近年はゲリラ豪雨といわれる、短期間に激しく降る大雨の回数が増加傾向にあります。毎年平均で2万7千haの農地が水害に見舞われ、200億円もの作物被害が発生しています。

こうした自然的要因に加えて、低平地に広がる農業地帯では、地盤沈下が進んだり、周辺流域の開発により降った雨が農業用水路に一気に流入したりするようになった結果、湛水被害が拡大する地域が増えています。

湛水防除事業は、このような地域において排水機場や排水路を整備することにより、農地や集落の湛水被害を防止し、農業生産の維持、農業経営の安定を図るとともに、地域の安全確保に寄与しています。

湛水防除事業は、これまで主に関東平野北部、新潟平野、濃尾平野、筑後・佐賀平野などにおいて実施してきており、これらの地域は、低平地に開けた、我が国の食料生産を支える非常に優良な農業地域でもあります。

例えば、都市近郊に1万haを超える一大穀倉地帯が広がる濃尾平野は、地盤沈下が進み地域の半分近くが海拔0m地帯となっており、昭和51年9月の集中豪雨では農地約1万1千haが湛水し、床下浸水2万5千戸の被害がありましたが、湛水防除事業を重点的に実施したことにより、昭和51年と同規模の豪雨が発生した平成12年には、農地・家屋とも被害は殆ど発生しませんでした。

このような取り組みを、直近10年では、全国約220地区において行うことにより、農地

約 3 万 ha に加え、周辺家屋や公共施設等の湛水被害を防止しました。

湛水防除事業は、農家の責に帰さない外的要因によって生じている湛水被害を防止するものであり、対策が必要な地域が偏在し、またその対応には多額の投資を伴うことから、国による財政支援が必要であると考えています。

4. 地すべり対策事業の効果

地すべりは、降雨・融雪などに伴う地下水位の上昇や地震等がきっかけとなって、地面が大きな塊のまま斜面を下方に移動（すべる）現象です。日本列島各地に帯状に分布している第三紀層（水を含むと粘土状になりやすい地層）など特定の地層・地質の場所において、毎年数多く発生しています。

最近では、平成 20 年 6 月の岩手・宮城内陸地震の際、宮城県栗原市で最大落差 150m にも及ぶ地すべりが発生したほか、平成 21 年には、山形県鶴岡市において累積移動量 6m にも達する地すべりが発生しています。

一方で、地すべり地帯は、一般になだらかな斜面になっており、地下水も豊富で、昔から棚田などの形で農業が営まれ農村が数多く形成されています。

このような地域でひとたび地すべりが発生すると、農業のみならず生活基盤自体に甚大な被害を与えることから、昭和 33 年の「地すべり等防止法」施行以来、50 年余にわたり、農業生産の維持を図るとともに、国土の保全と民生の安定に資することを目的として、対策を実施してきました。

現在、全国に 4,372 地区ある農地地すべりの危険がある地区において、地すべりの明確な兆候が現れると、「地すべり防止区域」の指定が行われ、都道府県知事が地すべり防止工事基本計画を策定し、対策を講ずることとなります。

これまで、地すべり防止工事は、指定された 1,943 地区、約 11 万 ha の「地すべり防止区域」において行ってきました。直近の 10 年間では、916 地区、約 6 万 ha の区域において対策工事を概成させています。

この対策工事により、農地約 8.9 万 ha と、集落や公共施設を含めた農地以外の約 6.3 万 ha とを合わせた約 15 万 ha の地域に対する地すべり災害を未然に防止しました。

地すべりの発生しやすい地域は第三紀層や破碎帯が多く分布する新潟・長野、島根、愛媛・徳島などに集中し、また、しばしば集中豪雨・融雪、地震などに伴って突発的に進行する傾向があり、対策には臨時巨額の投資が必要となります。

このような特徴を持つ地すべり災害については、各地域において必要な対策を適時適切に行うことができるよう、国は支援していく必要があると考えています。なお、特に国土保全上重要で、大規模な工事や高度な技術を要する場合は、都道府県知事の意見を聴いた上で、国自らが工事を実施しています。

IV. 農地防災の展開

これまで、個別箇所毎のハード整備により農用地・農業用施設の災害発生の未然防止を図ってきたところですが、これに加え、これからは、広域的・総合的視点を重視したハード整備の効率的な展開、ソフト施策の推進、地域とのつながりを重視した対策を進めていくこととしています。

1. ハード整備の効率的な展開

例えば、ため池改修にあたり、個々のため池毎に改修計画を策定するのではなく、広域的視点から地域の複数のため池の統廃合や、ソフト対策で対応するため池を検討するなどの取組みを進めます。

また、農村の総合的な防災安全度を高めるため、避難路整備等の避難対策も一体的に取り組みます。

2. ソフト対策の推進

農地災害の予測や情報連絡体制の整備やハザードマップの作成などを支援します。

また、住民協働に向けた環境づくりを支援します。

3. 農山漁村地域整備交付金

平成 22 年度から農地防災事業は基本的に農山漁村地域整備交付金に移行し、自治体の裁量による弾力的かつ機動的な運用が可能な制度のもと実施されています。

著者紹介

佐藤 具揮（さとう ともき）



経歴

昭和 59 年	北海道大学農業土木卒
昭和 59 年	農林水産省入省
平成 19 年	スリランカ国派遣（JICA 専門家）
平成 21 年より	農林水産省農村振興局整備部防災課海岸・ 防災事業調査官

嬭恋村の農地造成と保全

嬭恋村村長 熊川 栄

I. はじめに

嬭恋村は、群馬県の西北部、我が国でも有数の活火山浅間山の北麓に位置し、東は群馬県草津町・長野原町、南、西、北の三方は長野県軽井沢町・御代田町・小諸市・東御市・上田市・須坂市・高山村に隣接しており、上信越高原国立公園の2,000m級の山々が連なる雄大な自然に恵まれた高原の村であります。村の中央部を西から東に流れる吾妻川沿いにJR吾妻線とともに交通の中心である国道144号線が走っており、この谷間の比較的平坦な土地に集落の大部分が集まっています。面積は336km²を有しておりますが、山林原野が約75%を占め、その内の約40%が国有林であり、耕地面積は約3,300haとなっています。



II. 第1期農地造成（国営嬭恋西部開拓建設事業）の経緯と概要

嬭恋村は、平均標高1,000mという山間地帯にあるため自然的にも社会的にも大きな制約を受けており、近年において交通輸送の便が開かれるまではその可能な限りの農地に稲麦、その他の雑穀を作り自給的生産を中心とし、換金作物として養蚕を行うという古来からの穀桑式農業が続けられてきました。

高原野菜が嬭恋村に導入されたのは、明治の末年であるがほんの試作程度で普及するまでには至らなく、商品化を目的としてキャベツが作られたのは、昭和4年田代部落の有志者による共同植え付けにはじまります。この年は生育状態も良く好成績を納めたが、翌昭和5年には腐敗したり裂球が出来たりして失敗に終わり田代における商品としてのキャベツ栽培もわずか2年で中断してしまいました。その後昭和8年に至り県道の改修がなされ交通の便が開けると同時に、再び商品化を目的としたキャベツ作への意欲が急速に高まり、田代ではこの1年にしてほとんどの農家が野菜栽培に転換してしまう程のいきおいであり、もともと田代、大笹においては、水田が殆ど無かったため、当時はアワ、ヒエ等の雑穀類を主食とし、わずかに馬鈴薯とマユを女子の手によって商品として生産し、男子は炭焼き、その他の労賃による収入を得て米を買うといった生活をしていました。このため未経験の作物とはいえ現金収入の魅力が大きい高原野菜への転換が容易にできたのである。生産されたキャベツは、当初自動車で出荷されてい



資料：写真で見ると嬭恋のあゆみ

たが昭和18年国鉄長野原線の開通によってほとんどが貨車輸送に切り替えられたが、しかしそれも僅かの間で戦後道路運輸事情の好転によって、再びトラックによる輸送が行われるようになりました。

一方戦後、新しく生まれた農協による本格的な出荷態勢が確立し、更に昭和25年蔬菜類の統制が撤廃されたのを契機として年毎に栽培面積も増加し、特に立地条件に恵まれた西部地区（田代、大笹）においてその生産は非常な勢いで伸び、かくして、嬭恋村は昭和41年8月夏秋キャベツの野菜特産地域に指定され、キャベツを主要作物に白菜、レタス等の生産地として農業経営の中心をなし首都圏を始め各地に野菜を供給する重要な役割を持つに至りました。

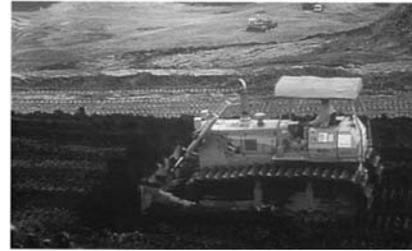
ところが近年連作障害による根こぶ病、萎黄病が急速に蔓延し農業経営をおびやかす程になってきました。この対策としては薬剤である程度抑制はできますが投資の割合に効果は少なく永続使用にも問題があるため抜本的方策としては輪作体系の確立と土壌の老朽化防止以外なく、幸いにこの地域には開拓適地があるので「国営パイロット事業」として国有林、民有林817.5haを活用開拓して輪作体系を確立し、農地の集団化によって大型機械を導入し省力化を計ると共に道路、畑地かんがい施設、防除用水施設等を整備して農家経営の安定向上を計ることを目的とし嬭恋西部開拓建設事業を実施することになったものであります。

事業概要	事業年度	着工	昭和45年、完了	昭和53年
	総事業費	3,560	百万円	
	受益戸数	561	戸	
	地区面積	817.5	ha	
	造成面積	570.4	ha（山成工法）	
	幹線道路	22.6	km	幅員5.5m
	支線道路	36.2	km	幅員4.0m
	畑地かんがい施設	91.0	ha	
	防除用水施設	479.4	ha	
関連事業	広域農道浅間地区	延長9,663	m	幅員7.0m 昭和52～61年
	農免農道大笹地区	延長3,538	m	幅員6.0m 昭和48～51年

Ⅲ. 第2期農地造成（国営嬭恋開拓建設事業）の経緯と概要

昭和41年に夏秋キャベツの野菜指定産地となり、昭和45年～昭和53年に行われた国営嬭恋西部開拓建設事業をはじめ県営開拓パイロット事業（昭和46年～昭和57年293ha）、団体営農地開発事業及び自主開墾により経営規模の拡大、農道整備等による大型機械化が図られ、全国でも有数のキャベツ産地に発展してきましたが、キャベツ栽培が盛んになるにつれ連作障害が発生し農業経営を脅かされつつあることから、キャベツの品質向上と安定供給を図るため、輪作体系の確立が強く望まれており、これを実現するた

めには、経営規模拡大により他の作物の導入と、基幹作物であるキャベツの計画的な作付けが不可欠であることから、早急に新たな農地の造成が望まれ未開であった四阿山山麓の国有林を活用し農地の造成と幹線道路網を整備する国営婦恋開拓建設事業を実施することになったものであります。



事業概要	事業年度	着工	平成元年、完了	平成13年
	総事業費		30,600	百万円
	受益戸数		267	戸
	地区面積		585	ha
	造成面積		404	ha (改良山成工法)
	幹線道路	19.4	km	幅員7.0m
	支線道路	15.2	km	幅員5.0m
	橋梁工	5ヶ所		
		熊野大橋	延長297m	幅員7.0m
		鳴尾大橋	延長132m	幅員7.0m
		大横川橋梁	延長45m	幅員7.0m
		干俣川橋梁	延長20m	幅員7.0m
		今井川橋梁	延長26m	幅員7.0m
	雑用水施設	延長7,975	m	取水工14ヶ所
関連事業	農免農道四阿山東麓地区	延長2,610	m	幅員7.0m 平成3年～9年



IV. 環境保全型農業の推進

嬭恋村では、平成7年に安定した農業経営を目指した環境保全型農業の推進を図ることを目的とし、系統・系統外を問わず情報を共有し問題解決を行う組織として嬭恋村環境保全型農業推進協議会を発足しました。協議会は、役場やJAを中心に、肥料・農薬販売店、試験場や普及など県関係機関と、各地区の生産団体の役員が構成員となり、嬭恋村の農業全体を網羅できる唯一の組織であり次のような活動に取り組んでいます。

- ・農薬適正使用への取り組み

農薬使用に関する啓発活動はもとより、キャベツをはじめ、村内の主な品目への農薬情報の提供も行っております。特徴的なのは、収穫間近になったほ場に旗を立て周囲へ知らせる「黄色い旗運動」であります。

- ・土壌流亡防止に関する取り組み

畑の表土流失を極力抑えるため、グリーンベルト設置を中心に取り組みを行っております。平成13年から協議会の組織改編をし、各地区生産団体の役員を加え、グリーンベルトを農家参加型のとも補償方式としてグリーンベルト設置を戦略的かつ効果的に推進しております。

- ・廃プラスチック・廃ビニール等の適正処理に関する取り組み

協議会では、嬭恋独自の取り組みとして、通常の廃プラスチックの他に、肥料袋、農薬の空き容器や、数年おきに小農具や農業機械、廃棄農薬の回収も行っており、地域の実情にあわせた事業としております。

- ・減化学農薬、エコファーマーへの取り組み

嬭恋村では、性フェロモン剤が積極的に利用され、エン麦野生種の作付けも多く、化学農薬だけに頼らない取り組みが行われています。生産者の多くがエコファーマーの認定を受け、414名キャベツ生産者の78%を占めています。



「黄色い旗運動」は、嬭恋での成功を受け、全農ぐんまで取り組むことになり、群馬県全体に波及することになり、冬キャベツ産地にも同様の取り組みが普及してきています。



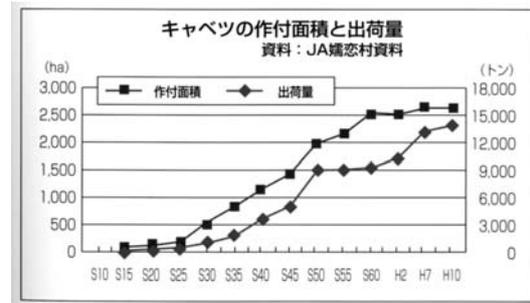
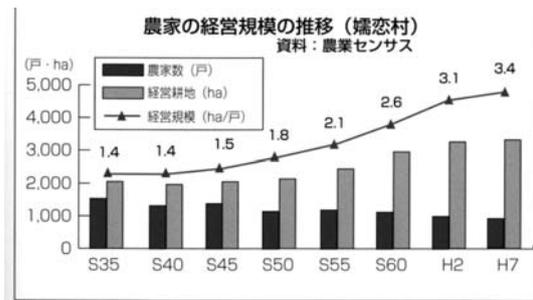
また、嬭恋村で行われているグリーンベルトや収穫後のエン麦野生種の作付けは、生産者ごとに取り組める表土流失軽減対策として注目され、県外からも多くの視察がやっています。

農薬問題への取り組みでは、社会問題までになった無登録農薬問題対策、栽培履歴記帳運動、ポジティブリスト制導入による農薬飛散防止対策、残留農薬自主検査、廃棄農薬の回収などを行っております。

V. 孺恋村の農業

孺恋村の主要農作物収穫面積の推移を農林業センサスにより見るとキャベツにおいては、昭和25年に158haであったものが、第1次農地造成事業後の昭和55年に1450ha、第2次農地造成事業後の平成12年に2,791haとなっています。これは、国営農地造成事業の外、県営事業、団体営事業、個人開墾等により農地の造成がなされた結果で、孺恋村の農地面積飛躍的増加が図られたものとなっております。

平成19年度におけるキャベツ生産出荷量は、1,722万ケース（1ケース10kg）であり、夏秋キャベツ全国総出荷量384,600tの内、孺恋村は177,900tであり46.2%を占めております。方面別の出荷先は、関東909万ケース（53%）、京阪神284万ケース（16%）、中部・中京273万ケース（16%）、九州・沖縄118万ケース（7%）、中・四国104万ケース（6%）、東北34万ケース（2%）となっております。



(単位：ha)

区分	キャベツ	白菜	レタス	馬鈴薯	大根	水稲
昭和25年	158	51	-	280	33	158
昭和35年	424	146	7	56	58	177
昭和40年	641	142	3	208	39	173
昭和45年	1,047	188	72	97	19	175
昭和50年	1,225	224	103	148	19	133
昭和55年	1,450	134	182	160	26	102
昭和60年	2,044	50	127	224	41	85
平成2年	2,506	42	36	152	81	58
平成7年	2,538	50	16	81	65	45
平成12年	2,791	38	9	57	26	17
平成17年	2,757	37	17	43	8	18

(農林業センサス)

VI. おわりに

孺恋村では、第2次農地造成（国営孺恋開拓建設事業）により整備された幹線道路を活用し、孺恋キャベツマラソン大会を実施し、全国各地から約3,000人の参加者があり、キャベツ畑の中を走り抜けております。

又、村の名前は、第12代景行天皇の皇子「日本武尊（やまとたけるのみこと）」の東征

中、日本武尊の船は嵐のため進むことができなくなり、海の神の怒りによるものと察した妻の「弟橘姫（おとたちばなひめ）」は自らの身を海に投じ、この嵐を鎮めることができました。東征の帰路、日本武尊は碓日坂（現在の孺恋村鳥居峠）で亡き愛妻、弟橘姫を想い「吾婦者耶（あづまはや）」（ああ、わが妻よ、恋しい）と嘆いたという故事にちなんで「孺恋村」と名付けられており、これにちなんで孺恋村では、「愛妻の村づくり」が展開されており、毎年9月には、「キャベツ畑で愛を叫ぼう（キャベチュー）」が実施されております。

さらには、村のキャベツ等を活用した特産品づくりも展開されており、「キャベツサブレ」、「キャベツこうばい」、「キャベツクッキー」等が試作され、販売されております。

著者紹介

熊川 栄（くまがわ さかえ）



経歴

昭和 41 年	群馬県立渋川高等学校卒業
昭和 46 年	中央大学 法学部卒業 衆議院議員秘書、(株)ジェイアールピー社長 等を経て
平成 19 年より	孺恋村村長
平成 21 年	明治大学特別招聘教授

畑作に強い関東ローム表層土壌の基本的物理性と固相構造

三重大学大学院生物資源学研究科 成岡 市

I. はじめに

風乾していない火山灰土(黒ボク土)の固相構造について、既往研究では表-1 にまとめて示したような土壌物理特性が得られている。また、これらの特性に加えて、突き固め曲線の特徴、乾燥・湿潤過程におけるヒステリシス特性、練り返しによる軟化・硬化現象、最大乾燥密度と最適含水比の関係など、非火山灰土壌と比べてもきわめて特徴的な工学的特性を有し、これは同時に農家が関東ローム表土を畑作として利用する場合の、ある種の経験則としても知られている。

本報では、関東ローム表層黒ボク土の、風乾していない、しかも現位置において乱されていない状態での基本的土壌物理特性と構造の一例を挙げ、これらの特徴が畑作に強いことの意義についてあらためて確認したい。加えて、我が国における 1970~80 年代の火山灰土研究の成果と比較してみたい。

表-1 風乾されていない表層火山灰土壌(黒ボク土)の主な物理特性

[1]比重, 含水比	
[1-1]比重 (2.2~2.5) が小さい	前田ら,1976
[1-2]自然含水比 ($100\sim 200\times 10^{-2}$ kg/kg) が大きい	前田ら,1978
[1-3]液性限界 ($120\sim 250\times 10^{-2}$ kg/kg) や塑性限界 ($60\sim 100\times 10^{-2}$ kg/kg) が大きく, 広い範囲を示す	竹中ら,1977; 前田ら,1983
[2]乾燥密度, 保水性	
[2-1]乾燥密度 ($0.4\sim 0.6$ Mg/m ³) が小さい	前田ら,1976; 前田ら,1983
[2-2]固相構造が主因となり, 高い保水性が実現している	竹中ら,1977; 前田ら,1978
[3]間隙構造	
[3-1]団粒構造が発達し, 粗間隙が多い	田淵ら,1963; 前田ら,1978; 前田ら,1980
[3-2]有機物含有量によって間隙径に特徴的な型がある	成岡ら,2000
[3-3]自然構造の団粒間隙は等方的な分布となっている	成岡ら,2000
[4]透水性	
[4-1]透水性 (飽和透水係数は $10^{-2}\sim 10^{-3}$ cm/s のオーダー) が高い	田淵ら,1963; 前田ら,1980
[4-2]粗間隙が飽和浸透水の主要流路になっている	田淵ら,1963; 成岡ら,2000
[4-3]締固めにより浸透水流路の縮小化・不連続化・屈曲度増加・広狭差増加などが発生し, その結果飽和透水係数が低下する	成岡ら,2000

II. 事前を知っておきたい関東ローム表層土(成岡ら, 1992)

(1)堆積過程と分布: 関東地方の西側にはいくつかの火山があり、第四紀(約 260 万年前から現代までの期間)の活動期には、南関東(およそ千葉県、埼玉県、東京都、神奈川県)では富士・箱根、北関東(およそ茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県)では浅間・榛名・赤城・男

体山などからの火山灰(火山碎屑物、テフラ；tephra)が西風に乗って堆積し、いわゆる関東ローム層が形成されている。

(2)典型的な「関東ローム層」：同一土層の判定に用いられる「鍵層」(かぎそう；key bed, marker bed)が知られている南関東では、表層から下層に向けて、堆積年代の新しい順に、立川ローム層、武蔵野ローム層、下末吉ローム層、多摩ローム層が重なっている。関東地方の面積の4割程度はこのような火山灰土で覆われ、表層はたいてい「黒ぼく土」が覆い、この地方の農業に特有な効果・影響を与えている。

(3)畑作の特徴：関東ローム台地といえば、かつては千葉県のさつまいもや落花生に代表される畑作農業が主力であり、作物の変遷はあるが、現在でも首都圏の主要な畑作地帯となっている。畑地に限らず、冬になると、関東地方では名物の空っ風が吹き荒れ、土ぼこりの嵐が起り、また前夜の気温が低い朝には地表面に霜柱ができる。この霜柱が解けると、ベタベタになった泥が靴底について簡単にとれなくなり、放っておいて歩き続けると、靴は泥だるまになって歩けなくなることもある。

(4)「黒ぼく土」：最表層は多量の腐植を含み、暗黒色を呈し、下層は通常厚く、黄色または褐色をしている。一般に透水性や保水性に富み、固相体積が小さく、約80%が水と空気で占められている。含まれている主要粘土鉱物はアロフェン(allophane)といい、火山ガラスが風化して生成される外径約5nmの中空球状構造となっている。リン酸吸収係数が高く、乾湿による構造変化に非可逆的応答を示す。また微細団粒が発達しているながら、団粒間に働く凝集力が小さいため、乾燥すると風に飛ばされやすく、土ぼこりの原因となる。水分を含んでいるときに練り返すと軟らかくなり、関東ロームを盛土する場合には相応の注意を促す必要がある。また、乾かすと硬くなる程度は、ローム層の層位や水分量によって異なる。その一方で、手を加えていない自然構造の関東ロームを乾燥させると軽くて崩れやすくなるという性質もある。農家はこの性質をよく知っていて、たとえば耕耘を適当な水分含量の時に行っている。

(5)畑の作土と農業：作土は農作業のために常に動かされているが、その下をスコップで掘り進むと、手付かずの自然構造土層がある。関東地方ではこのような層位から農耕の遺跡が数多く発掘される。また、目を凝らして土層断面をながめると、シャープペンシルの芯ほどの直径の孔が無数にあることがわかる。これは火山灰が堆積しつつある当時の地表面に育っていた植物の根の跡であり、これが管路網として土の中に張り巡らされていて、水・ガス・微生物などが自由に通り抜けたり留まったりしている。関東ローム層は、保水性と同時に排水性も高く、畑作物の生育や水資源涵養に計り知れない恩恵を与えている。

Ⅲ. 調べた供試土の採取地および測定項目

本報の分析対象とした供試土の採取地は表-2に示すとおりである。関東地方およびその周辺地域の黒ボク土に覆われた普通畑および林地の5地区18深度である。いずれも有機物含有量に富む(>10%)表層の火山灰土であった。この供試土は、不攪乱土(100cm³円筒によ

表-2 供試土の採取地

地区	深度 (cm)	有機物 含有量 (10 ⁻² kg/kg)	地形	土地利用	略称
北関東 栃木県芳賀市	5	10.8	台地	普通畑	芳賀
	15	10.8			
	25	11.2			
南関東 千葉県富里町	5	11.1	台地	普通畑	富里
	15	11.7			
	25	14.6			
	35	14.0			
	50	13.6			
	70	19.0			
北関東 長野県小諸市	15	14.9	山麓	普通畑	小諸
	20	15.1			
	35	16.9			
	50	18.1			
	70	15.8			
北関東 群馬県嬭恋村	30	21.2	山麓	林地	嬭恋
	50	17.6			
	80	15.9			
北関東 群馬県赤城村	10	11.9	山麓	普通畑	赤城

る)および攪乱土(ビニール袋に密封)を採取して、実験室内にて土壌物理特性を測定した。

測定項目は、有機物含有量(重クロム酸法)、真比重(国際法)、自然含水比、液性・塑性限界、乾燥密度(不攪乱土壌)、間隙率(不攪乱土壌)、飽和透水係数(不攪乱土壌；変水位法)などであり、微細間隙率(>pF1.8 相当)および粗間隙率(≤pF1.8 相当)は加圧板法により測定した。

IV. 測定した基本的土壌物理特性

1. 有機物含有量と基本的土壌物理性

畑表層土の「物理的熟成程度」に注目して考えたい。地表面に降り積もった火山灰は、徐々に厚みを増しながら地質的時間および土壌生成過程を経て、さまざまな種類の有機物を生物活動の累積の成果として含有し、関東ロームが特徴的な鍵層を有する土壌断面を形成する。含有する有機物量が土壌物理性項目とどのような関係を持つのか、いくつかの事例を検討する。なお、測定した有機物含有量は、10.80～21.20%(平均 14.68)の範囲にあった。

(1) 有機物含有量と真比重

畑表層土の骨格部分「ツブツブ状」について考える。水の密度に対する土粒子密度の比(無次元)を土の真比重と呼ぶ。これに対して、土粒子の質量と体積の比を土粒子密度(Mgm⁻³)と呼ぶ。測定した真比重は、2.35～2.70(平均 2.53)の範囲にあり、石英を主体とした平均的

な範囲の下限に相当していた。

有機物含有量と真比重との関係(図-1)については、従来から指摘されていることだが(前田ら,1983; 竹中ら,1977; 前田ら,1976)、「有機物含有量が多いほど真比重が小さく」、相関係数(r)は-0.78という特徴があり、土壌生成過程の進行程度が推定できる。図-1では、火山灰給源(赤城山、榛名山)から距離の遠い芳賀・富里群においてその程度が大きく(有機物が少なく、真比重が大きい)、給源から距離の近い小諸・嬭恋・赤城群では小さくなる(有機物が多く、真比重が小さい)傾向を示していた。

曰く、「関東ローム表土は、物理的熟成程度が高くなるほど軽くなる」。

(2) 有機物含有量と自然含水比，液性限界

畑表層土の「ドロドロ状、ベタベタ状」の程度について考える。土には外力に対する抵抗性が含水比によって変化する現象(コンシステンシー)があるが、そのうち土の液性的性状と塑性的性状の境界を液性限界と呼ぶ。有機物含有量と自然含水比・液性限界の関係図(図-2)から、有機物含有量の増大に伴い、自然含水比および液性限界も増大し、給源から距離の遠い芳賀・富里群でその程度(有機物量少なく、自然含水比および液性限界が小さい)が顕著であることがわかる。これは、竹中ら(1977)が指摘したように、土の有機物が水を保持・吸着する性質が強いことに起因していると考えられるが、同時に土壌生成過程による「土の物理的熟成度」ともいえよう。

曰く、「関東ローム表土は、物理的熟成程度が高くなるほど保水能力が高くなる」。

(3) 有機物含有量と乾燥密度

畑表層土の「ホクホク状、ボクボク状」の程度について考える。「黒ぼく土」と命名された由縁が、表層土を踏みしめるときの音にあると伝え聞く。土の乾燥密度は有機物含有量との関係よりも、むしろ堆積環境に起因するところが大きい。たとえば、有機物の多い土壌はその骨格構造が弱く、転圧によって圧縮されると密度が大きくなったり、耕うんによって膨軟になり密度が小さくなる。有機物含有量と乾燥密度との関係図(図-3)では、相関係数が-0.60となっている。

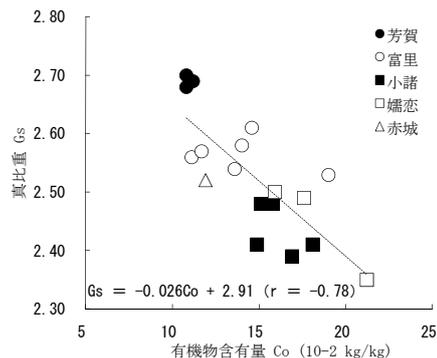


図-1 有機物含有量と真比重

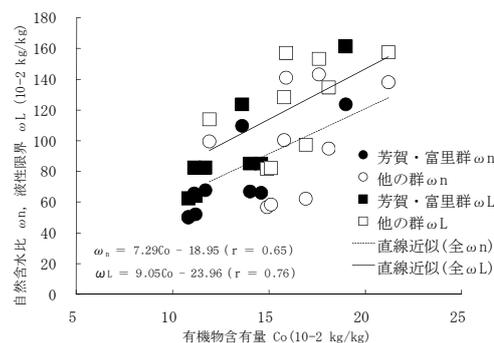


図-2 有機物含有量と自然含水比，液性限界

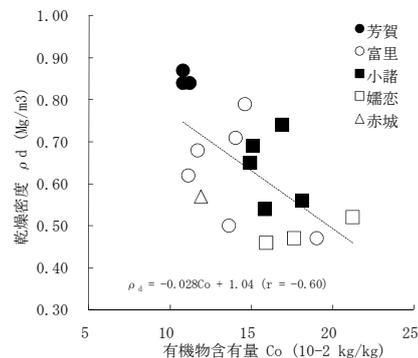


図-3 有機物含有量と乾燥密度

曰く、「関東ローム表土は、物理的熟成程度が高くなるほど乾燥密度が小さな『ホクホク状』になる」。

(4) 有機物含有量と微細間隙率

畑表層土の毛管張力を考える。土構造に形成される微細間隙は、土の水分を保持する重要な毛管構造の一つである。毛管構造が狭くなる(小さくなる)ほど、毛管張力(保水力)が大きくなる。有機物含有量と微細間隙率の関係図(図-4)では、有機物含有量 12%程度を境に、それ以上になると微細間隙率が大きくなっている。有機物含有量は、12%以下では微細間隙率にほとんど影響しないが、12%以上では微細間隙率が大きくなる(保水性が高まる)傾向にある。

曰く、「関東ローム表土は、物理的熟成程度が高くなるほど微細間隙率および保水力が大きくなる」。

(5) 自然含水比と乾燥密度

畑表層土の水分保持量を土の「ホクホク状、ボクボク状」程度から考える。自然含水比と乾燥密度の関係図(図-5)では負の相関($r = -0.89$)があり、乾燥密度が大きい土壌ほど自然含水比が小さいことを示している。なお、同図に表されている円の直径は有機物含有量の大小を示し、最大値 21.2kg/kg～最小値 6.9kg/kg の範囲である。

曰く、「関東ローム表土は、物理的熟成程度が高く『ホクホク状』になるほど保水力が大きくなる」。

2. 固相構造と間隙構造

(1) 塑性図

前述までは、畑表層土の「物理的熟成程度」を有機物含有量に照らして考え、基本的土壌物理性の特徴について整理した。これらの比較項目から、次に、畑表層土の「圧縮性の程度、体積変化の程度、透水性の程度、粘り強さ」などについて考えたい。

液性限界と塑性指数(塑性図)の関係図(図-6)から、各供試土は、A 線の下側および B 線(LL=50%)の右側に分布し、圧縮性の高い粘性土に分類される。供試土の測定値は、この範囲において広く分布している。

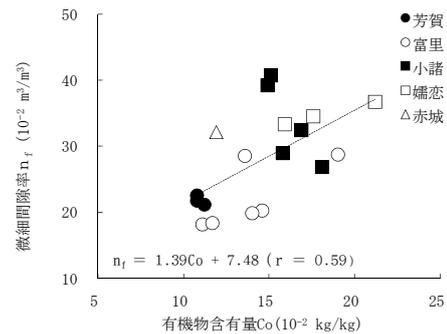


図-4 有機物含有量と微細間隙率

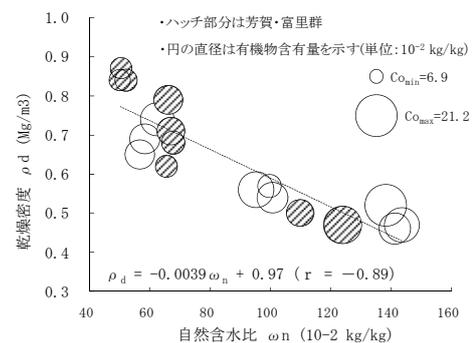


図-5 自然含水比と乾燥密度

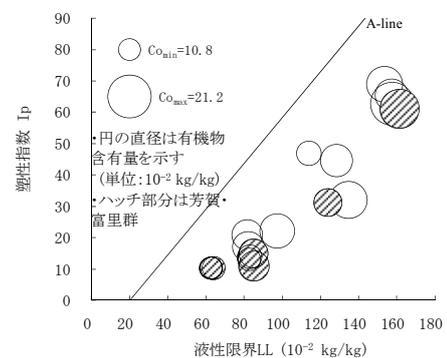


図-6 液性限界と塑性指数(塑性図)

曰く、「関東ローム表土は、つぶしやすく(圧縮性大)、水はけよく(透水性大)、脆い(粘り強さ小)」。

(2) 粗間隙率と飽和透水係数

畑表層土の排水性の良さの原因を土の粗間隙の視点から考える。粗間隙率と飽和透水係数の関係図(図-7)から、粗間隙率が大きいほど透水係数が大きくなる傾向がみえる。

ただし、これは対象地ごとに特有の特徴が見られ、たとえば富里のように粗間隙率に対して透水係数が小さい供試土もあった。この理由について、富里は圃場整備による盛土地点であり、土工に際して土壤構造の破壊・攪乱がなされ、粗間隙が存在してもその連続性が低く、土壤中の水みちが絶たれ、その結果透水係数が小さい値となったものと判断された。一方、芳賀の土壤は富里と対照的な土壤であり、芳賀の採取地点は乱されていない自然状態の土層であり、間隙の連続性が高く、その状態がよく保たれた条件で採取・試験が実施されたものと判断した。

曰く、「関東ローム表土は、粗間隙が多く、透水性(排水性)が高い」。

(3) 粗間隙率($\leq pF1.8$)と微細間隙率($> pF1.8$)

粗間隙率と微細間隙率の関係図(図-8)では、負の相関(-0.84)であり、粗間隙率が高いほど微細間隙率が低い傾向があった。加えて、近似直線の傾きが-0.91であることから、粗間隙と微細間隙のうち、どちらか一方が多くなると同時に片方は同量少なくなることを示し、また有機物含有量の多い土壤ほど粗間隙率が小さく、微細間隙率が大きい傾向にあることもみられた。

曰く、「関東ローム表土では、粗間隙と微細間隙は総量が同じに増減している」。

(4) 粗間隙と固相の配置

粗間隙または管状孔隙の立体構造を軟X線映像法によって写し出すと図-9のようにみえる。右下のスケールは、いずれも 10mm。上図は、黒ぼく表土の土壤基質を写し出した影

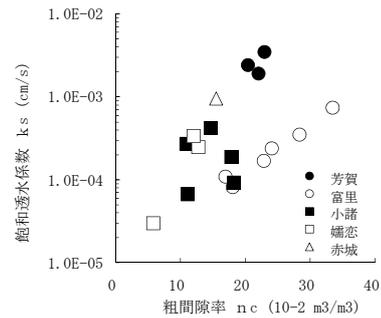


図-7 粗間隙率と飽和透水係数 (成岡・駒村(2000)に加筆)

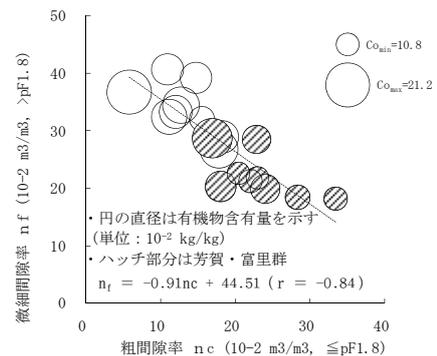


図-8 粗間隙率と微細間隙率

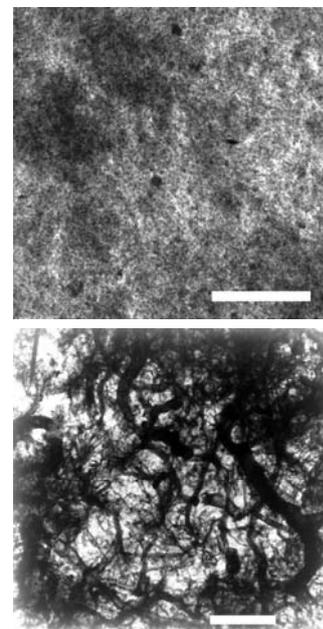


図-9 粗間隙と固相の実際の配列 (上図：富里表層土 N331、下図：筑波 D1 圃場下層土 N96271)

像であり、黒色部分が固相(土粒子または団粒)である。土壌基質に存在する粒団内間隙(または団粒内間隙)は、断面形状が不規則で一次粒子や二次粒子の骨格構造の幾何学的配列の規定されている。下図は、関東ローム下層の粗間隙(粗孔隙;管状孔隙)を写し出している。主要な太い管状孔隙は、内径 0.4~1.2mm、屈曲度 1.0~2.1mm/mm である。

模式的に考えると、表層土は「右図のような土壌基質構造」、下層土は「左図のような管状孔隙構造」があつて、土壌内の植物根、微生物、水、ガス、栄養分、老廃物などの成長・生活・移動・交換などが行われている。

曰く、「関東ローム表層から下層にかけて、粗間隙または管状孔隙の空間構造が発達していて、土の透水性や排水性が高くなっている」。

V. まとめ

- (1) 含水比の大きい土壌ほど乾燥密度が小さいことを示した。前田ら(1986)の分類に従うと、A型火山灰土には有機物含有量 15%以上や乾燥履歴を受けていない下層土が多く、B型火山灰土には乾燥履歴を受けた表層土ないし表層近くの土壌が対応していた。
- (2) 粗間隙率と微細間隙率の関係は負の相関があり、粗間隙率が高いほど微細間隙率が低い傾向となっていた。この中で、有機物含有量の多い土壌ほど粗間隙率が小さく、微細間隙率が大きい傾向が見られた。
- (3) 有機物含有量と真比重の関係は、有機物含有量が高いほど真比重が小さくなる傾向にあった。相関係数は 0.75 程度と若干低い値であり、この原因には真比重の大きさが、有機物含有量のみでなく造岩鉱物の比重による影響も受けていると考えられた。
- (4) 関東ローム畑表層土の「物理的熟成程度」に注目して、含有する有機物量が土壌物理性項目との関係を整理した。すなわち、
 - 1) 物理的熟成程度が高いほど軽くなる。
 - 2) 物理的熟成程度が高いほど保水能力が高くなる。
 - 3) 物理的熟成程度が高いほど乾燥密度が小さな「ホクホク状」になる。
 - 4) 物理的熟成程度が高いほど微細間隙率および保水力が大きくなる。
 - 5) 物理的熟成程度が高く「ホクホク状」になるほど保水力が大きくなる。
 - 6) つぶしやすく(圧縮性大)、水はけよく(透水性大)、脆い(粘り強さ小)。
 - 7) 粗間隙が多く、透水性(排水性)が高い。
 - 8) 粗間隙と微細間隙は総量が同じに増減している。
 - 9) 表層土は「土壌基質構造」、下層土は「管状孔隙構造」があつて、土壌内の植物根、微生物、水、ガス、栄養分、老廃物などの成長・生活・移動・交換などが行われている。

謝辞

本報をまとめるにあたり、故前田隆博士(北海道大学名誉教授)から研究の機会を与えられた。また関東農政局事務所、関係市町村、土地改良区の方々から現地試料採取のご便宜ならびに資料のご提供をいただいた。東京農業大学農地環境工学研究室専攻学生諸君には試料の分析に際して多大の協力をいただいた。これらの方々に厚く御礼申し上げます。

引用・参考文献

- 1) 駒村正治・成岡 市(1992): 畑地基盤としてみたクロボク土の特性と土壌工学的改善, 文部省科研費補助金, H3 年度科研総合研究 A(01302056, 研究代表者: 前田隆)
- 2) 成岡 市・駒村正治(1992): 農業と関東ローム、土と基礎、p.23、40(3)
- 3) 前田 隆・相馬尅之・佐々木清一(1976): 腐植が土の物理性におよぼす影響, 農土論集, 61 : 9-17
- 4) 成岡 市・駒村正治(2000): 固相配列と排水特性からみた関東ローム表層黒ボク土の粗間隙の特徴, 農土論集, 210 : 19-27
- 5) 田淵俊雄・田淵公子・長田 昇(1963): 関東ロームの大間ゲキと透過性との関係, 農土研別冊, 7 : 53-60
- 6) 竹中 肇・足立忠司・堤 聰・長田 昇・河野 洋・小谷佳人・三輪晃一(1977): 火山灰および非火山灰段丘堆積物に由来する有機質土の物理的性状, 農土論集, 71 : 1-7
- 7) 前田 隆・堤 聰・相馬尅之(1978): 農地基盤としてのクロボク土の物理的特徴, 農土誌, 46 : 877-884
- 8) 前田 隆(1980): 土壌の理工学性に関連する物理化学的成果の現状と今後の課題(火山灰土を中心として), 土壌の物理性, 41 : 36-54
- 9) 前田 隆・相馬尅之・足立忠司・竹中 肇・堤 聰(1983): クロボク土の物理性の特徴と問題点, 農土論集, 103 : 1-12

著者紹介

成岡 市 (なりおか はじめ)



経歴

東京都に生まれる

東京農業大学総合研究所、岡山大学環境理工学部などを経て
平成 16 年より 三重大学大学院生物資源学研究所 教授

土壌侵食の広域推定および土砂流出対策

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構
農村工学研究所 塩野 隆弘

I. はじめに

私たちは、資源を利用する知識や技術を手に入れてより快適な生活を獲得してきたが、その一方で、資源の枯渇や質の劣化、地球環境の破壊などの諸問題を抱え込むことになった。農業生産活動では、過度な農地利用や農地面積の拡大などが農地の土壌侵食という問題を引き起こしている。畑地における土壌侵食は、土壌の剥離・流失によって表層土壌を消失させ土地生産力の低下をもたらす。さらに、畑地から流出した土粒子は表面流出水によって輸送され、水路や貯水池などの水利施設に堆積して施設の機能低下や耐用年数の低下をもたらし、また、河川や湖沼、沿岸域に沈降・堆積して環境や生態系に影響を与える。このように、土壌侵食は、農業生産性の問題にとどまらず、下流域における環境や生態系の保全という観点からも問題視される。したがって、農業生産性の向上を図りつつ持続的な農業生産を行ない、かつ環境保全に配慮した農業を行うためには、土壌侵食対策の実施が重要である。

土壌侵食対策を実施するには、対策効果、経済性及び継続性などの視点を踏まえた合理的な計画や設計が必要である。これまで、農地の土壌侵食対策法として、工学的対策法（たとえば、土層改良、階段畑工、排水路工、ガリ安定工、沈砂池工）や営農的対策法（たとえば、侵食防止作付体系、深耕、有機物施用、横畝栽培、等高線带状栽培、草生帯、マルチング、不耕起栽培）が提示されている。このため、「どこでどのくらいの土壌侵食が発生しているか」という土壌侵食実態を把握した上で、適切な対策を選定し実施することが必要である。また、土壌侵食対策が継続的に行われるためには、対策施設の維持管理による負担や農家などの対策実施者が負う負担が小さい対策法が求められる。

こうしたことを踏まえて筆者らが取り組んだ「畑地帯における土壌侵食の広域推定手法」と「畑圃場からの土砂流出対策法」に関する研究を紹介する。

II. 畑地帯における土壌侵食の広域推定手法 (Shiono et. al, 2002)

1. 背景と目的

効果的かつ合理的な畑地帯での土壌侵食対策を実施するためには、まず「畑地帯のどの圃場でどのくらいの土壌侵食が発生しているか」という土壌侵食実態を把握することが必要である。しかし、わが国では土壌侵食実態に関する観測データは十分に蓄積されておらず、また、土壌侵食の観測には多大な時間と労力を要する。このため、土壌侵食予測式等を援用して土壌侵食量を推定する方法は実践的な手段の1つと考えられる。

Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978) は、圃場スケールでの

畑地の年平均土壌侵食量を予測する式で、降雨、土壌、地形、作物、保全管理に関する各係数値を用いて算出される。USLE を用いて畑地の土壌侵食量を推定するには、USLE の各係数値を侵食が発生する斜面ごとに与える必要がある。このため、対象領域が拡大するにしたがって、係数値の導出等に関する莫大な作業労力が必要となってくる。こうした中、地理情報システム（Geographical Information System、GIS）の利用によって係数値の導出や土壌侵食量の推算作業の効率化が図られ、広域を対象とした土壌侵食量推定が可能となってきた。

しかし、これまでに実施された土壌侵食量の広域的推定はメッシュ単位で行われ、USLE の地形係数の算出単位と考えられる斜面とメッシュの領域が一致せず地形係数の評価が不十分であった。また、1メッシュに営農管理が異なる複数の圃場が含まれる場合は作物係数や保全管理係数の決定が困難であるなどの問題点がある。

そこで、筆者らは圃場1筆ごとにUSLEを適用して畑地帯の土壌侵食量を推定する手法を提示した。圃場1筆は営農や保全管理の最小単位と考えられるので、土壌侵食対策を計画する目的において効果的な推定単位と考える。

2. USLE

USLE は、以下に示すとおり土壌侵食に関する各因子の係数値の積によって年平均土壌侵食量を推定する式である。

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

A：年平均土壌侵食量(t ha⁻¹ y⁻¹)

R：降雨係数(MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹)

K：土壌係数(t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹)

LS：地形係数（無次元）

C：作物係数（無次元）

P：保全管理係数（無次元）

R 係数は降雨による侵食力を示す尺度で、一連続降雨の運動エネルギーとその降雨における最大 30 分間降雨強度との積の累積値の年平均値として表す。K 係数は土壌の受食性を示す尺度で、枠試験による土壌侵食量の観測結果に基づいて経験的に求められる。LS 係数は地形が土壌侵食に与える影響度合いを示す尺度で、斜面長と斜面勾配の値から求められる。C 係数は作物栽培による土壌侵食量の変化割合を示す指標で、裸地条件と作物栽培条件での土壌侵食量の割合から経験的に決定される。P 係数は、横畝栽培や等高線栽培のように土壌侵食を抑制する保全行為の効果の度合いを示す指標で、C 係数と同様に経験的に決定される。

3. 畑地帯の土壌侵食量の広域推定手法

土壌侵食量の広域推定を実施した畑地帯は、関東地方の標高約 700～1,400m の高原地域に位置し、圃場数は 11,544 筆で面積は 3,009ha である。この畑地帯の年平均降水量は約 1,500mm で、年平均気温は約 7.5℃である。畑地は傾斜地が多く、それらの一部では土壌侵食が発生する。畑地の表層土は主に黒ボク土で、その層厚は 40～80cm である。この地帯では、春から秋にかけてキャベツを中心とした高原野菜を生産している。

対象とする畑地帯の土壌侵食量の広域推定は、圃場ごとに USLE の係数値を導出し土壌侵食量を推算した。表 1 に導出した USLE の各係数値を示す。R 係数は、対象地帯内に位置するアメダス観測地点の 10 分間降雨データ（気象庁提供）を用いて算出した。K 係数は、対象面積の約 98%を占める黒ボク土の係数値を代表値として用いた。この係数値は、4 筆の圃場（合計面積 2.97ha）と集水路、沈砂池で構成される農地造成団地で行った侵食土砂堆積量調査の測定結果に基づいて求めた。各圃場の LS 係数は、圃場の平均斜面長と平均勾配から算出した。USLE では、斜面長は表面流出の発生地点から斜面勾配が減少して堆砂が生じる地点または流出水が水路に流入する地点までの距離と定義している。対象地帯の圃場境界は、道路や水路、植生をとまなう畦などによって区切られていることから、圃場 1 筆を 1 斜面とみなし、斜面長は圃場の傾斜方向における圃場の長さとした。具体的な算出作業は、まず地形図をスキャナー入力によりデジタル化して圃場の区画情報と数値地形モデルを作成し、圃場の区画形状を持つ板状斜面にモデル化して圃場の平均斜面長と平均勾配を求め（図 1）、最終的に LS 係数を算出した。C 係数は、対象領域における栽培作物の収穫面積に基づいて重み付け平均した係数値を各圃場に与えた。これは、主要作物のキャベツとその他の作物により輪作が行われていることによる。P 係数は、対象領域内では農地保全の行為がみられなかったため 1.0 を与えた。

表 1 算出された USLE の各係数値

係数	係数値	参照データ
R	2,890 MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ y ⁻¹	アメダス 10 分間降雨データ（1994.4～1999.3）
K	0.0060t ha h ha ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹	黒ボク土の係数値、侵食土砂堆積量調査に基づく
LS	0.03～13.5	1/1,000 地形図の地理情報処理に基づく
C	0.3	栽培作物の収穫面積に基づいて重み付け平均
P	1.0	保全行為なし

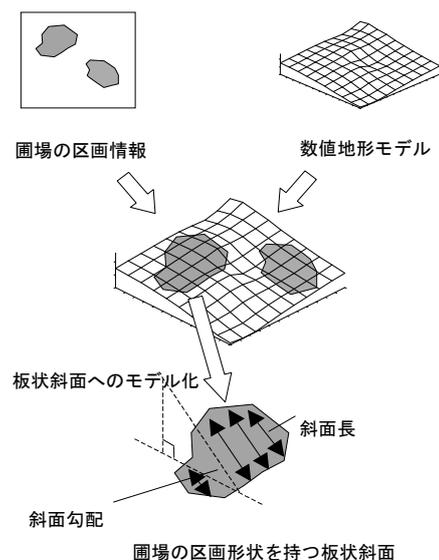


図 1 圃場形状の板状斜面へのモデル

4. 畑地帯の土壤侵食量の広域推定結果

図2に各圃場の土壤侵食量の推定結果を示す。これによれば、各圃場の推定土壤侵食量は $0.2\sim 70.6\text{ t ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ の間に分布し、単位面積あたりの年平均土壤侵食量は $10.5\text{ t ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ となった。農林水産省構造改善局計画部（1992）によれば、農地の高い生産性を維持していく上で許容される侵食土量（許容侵食土量）は、表土層の厚さが30cm以上ある場合年平均1mm程度とされている。本地区の表層土壤の乾燥密度を 0.7 g cm^{-3} と仮定すれば、単位面積あたりの許容侵食土量は $7\text{ t ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ と算定される。この数値を用いれば、許容侵食量以下となる圃場は5,807筆、合計面積1,116haで、許容侵食量を上回る圃場は5,737筆、合計面積1,893haであった。

5. 土壤侵食対策効果の試算

上述の現況条件下における土壤侵食量の広域推定結果を活用して、土壤侵食対策計画へ向けた対策効果の試算を行う。土壤侵食対策の1手段として横畝栽培が挙げられる。そこで、トラクタの作業能率が著しく低下するとされる傾斜度（ 6° （ $=9.5\%$ ））以下の圃場および、トラクタの作業能率は低下するが危険を伴わずに作業が可能であるとされる傾斜度（ 8° （ $=12.6\%$ ））以下の圃場において、それぞれ横畝栽培を実施すると仮定した場合の土壤侵食量を試算した（ここでは、前者をCase 1、後者をCase 2と呼ぶ、図3）。試算の結果、圃場全体での単位面積あたりの年平均土壤侵食量は、Case 1の場合 $8.3\text{ t ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ 、Case 2の場合 $6.7\text{ t ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ と推定され、現況条件下に比して21%および36%減少すると見積

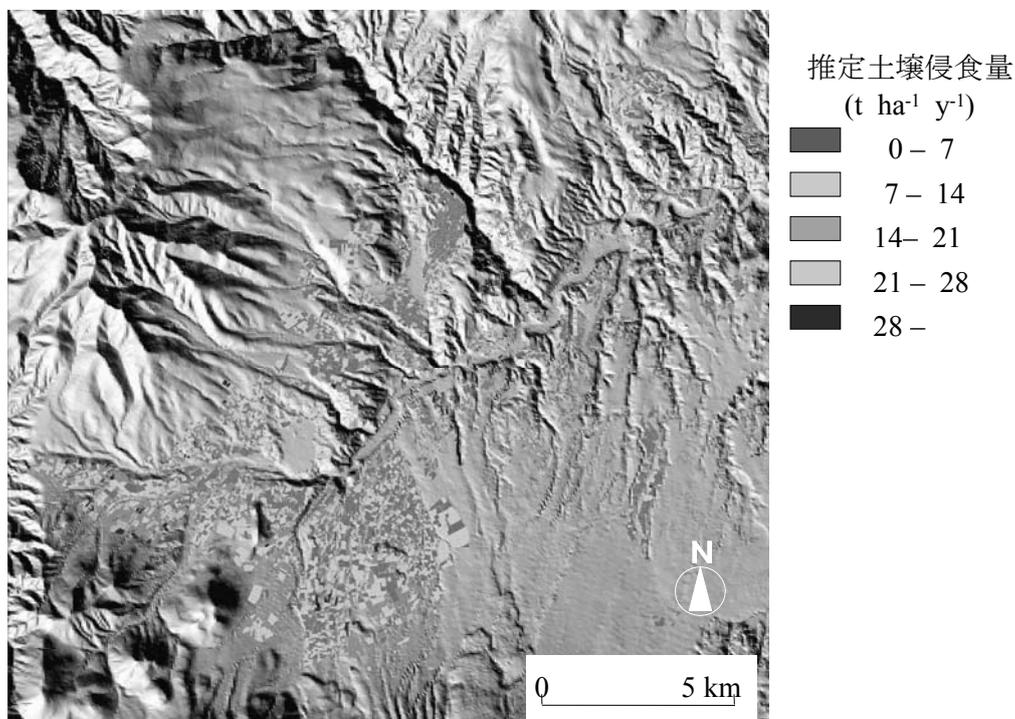


図2 各圃場の土壤侵食量の推定結果

もられた。さらに、各圃場の土壌侵食量の分布を現況条件下での算定結果と比べてみれば、単位面積あたりの土壌侵食量が $7\sim 14\text{ t ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ と算出された圃場が減少し、 $0\sim 7\text{ t ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ と算定された圃場が増加した。また、土壌侵食量が $14\text{ t ha}^{-1}\text{ y}^{-1}$ 以上と算定された圃場については大きな減少は見られなかった。これらのことから、Case 1 および Case 2 の保全対策によって全体的な土壌侵食量の減少は見込めるが、土壌侵食量が大いといと評価された圃場ではこうした効果は見込めず、これらの圃場では他の保全対策が必要となることが示唆される。

6. 今後の課題

本手法により現況条件下での各圃場の土壌侵食量の推定値を得ることができた。許容侵食土量との比較を行うことにより、土壌侵食対策の必要性や対策計画の検討に有益な情報をもたらすものとする。

地形係数 LS の算出に関しては、従来のメッシュ単位の推定手法に比べて、より USLE の算出方法に沿った土壌侵食量の推定が可能になった。さらに、衛星データの利用などによって各圃場で栽培されている作物を特定することができれば、対象地域における栽培作物の分布実態を直接表現でき、よりきめ細やかな土壌侵食量の推定が可能となるであろう。

USLE で用いる土壌係数 K や作物係数 C は、日本の土壌や作物について実測データに基づいて決定されたものが十分に整備されていない。今後、本手法を他の地区に適用する場合は、こうした係数値の整備に向けたデータの蓄積が必要と考える。

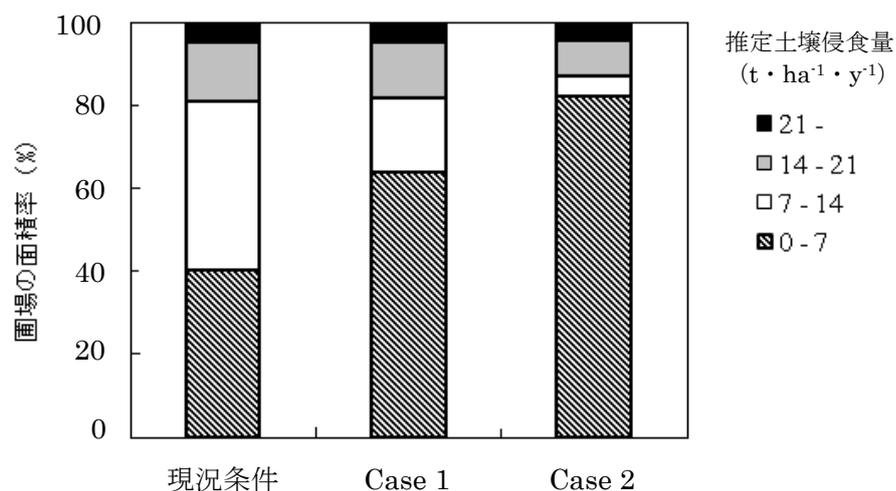


図3 各保全条件における圃場の推定土壌侵食量の面積分布
(Case 1 は傾斜度 6° 以下の圃場で横畝栽培を実施した場合、Case2 は傾斜度 8° 以下の圃場で横畝栽培を実施した場合を示す。)

Ⅲ. 畑圃場からの土砂流出対策法

1. 背景と目的

沖縄地方では、降雨時に発生する土砂流出（赤土流出）が、公共用水域での水質汚濁や土砂堆積を引き起こし、水環境や沿岸漁業等に悪影響をおよぼし、社会問題の一つとなっている。農地は、赤土流出の主な発生源といわれ、農地における赤土流出対策の推進が重要な課題となっている。休閑期間および作物生育初期の農地は、地表面の被覆率が小さく赤土等流出の危険度が高いため、畑面植生、マルチング、不耕起栽培などの営農的対策法が重要な役割を果たす。しかし、こうした対策法は、実施主体である営農者に労力的・経済的負担がかかるため現場普及は十分に進んでいない。このため、営農者へ負担が少ない対策法の提示が求められる。

そこで、赤土流出対策法としてセンチピードグラスを用いた草生帯に着目し、沖縄本島北部の国頭マージ土壌の畑地における赤土流出対策の有効性とその負担について検討した。

2. センチピードグラスを用いた草生帯

草生帯は、圃場の下流端に帯状に設置した草類によって圃場外へ流出する土砂を捕捉する対策法である。赤土流出防止のための草生帯は、主に表面流出水の流速低下により土砂を沈降・堆積させて土砂流出を軽減する（図4）。一方、草生帯の設置は、耕作面積の減少を招くほか、作物生育や管理などの面で負担をもたらすと懸念されている。

センチピードグラスは芝草の一種で、省力管理が可能なことから、公園の芝や水田の法面や畦畔の被覆植物として着目されている。草生帯として用いた場合、匍匐茎で植生密度が高いため、水の流れに対する抵抗が大きく、強い流れでも倒伏しにくいことから、土砂流出を軽減する機能が大きい。播種により設置でき、沖縄地方の自然条件で生育するため施工が容易である。草丈が低いため、圃場の見通しが確保でき、除草の手間も少なく済む。また、更新や撤去の際は、除草剤で枯死させてすき込むことにより省力的に草生帯を撤去することができる。一方、播種後の生育は遅く、植被により十分に地表が被覆されるまで2～3か月かかる。

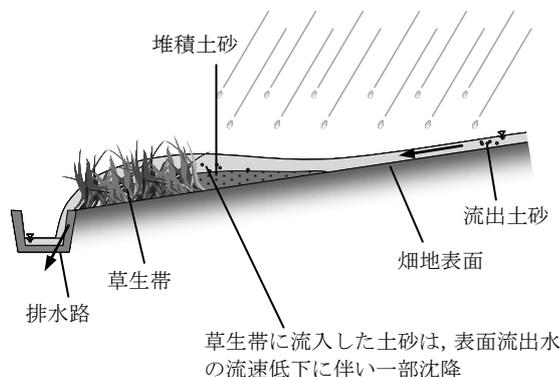


図4 草生帯による赤土流出対策の概念図

3. 裸地圃場条件の赤土流出に対する対策効果 (Shiono et al., 2007)

2002年～2004年にかけて沖縄県名護市嵐山地区の国頭マージ土壌の畑地において、センチピードグラスの草生帯による赤土流出対策の現地試験を行った。畑地には裸地区と草生帯区の観測試験区を設置した。各試験区は長さ31.5m、幅4.0m、勾配2%の裸地領域を持ち、草生帯区の裸地領域の下流には流れ方向の長さが0.5m～3.0mの草生帯を設置した。裸地区と草生帯区の総流出土砂量を比較して求めた草生帯の土砂流出軽減率は31～72%である(表2)。観測期間ごとに草生帯の土砂流出軽減率を比較すると、いずれの期間でも草生帯の流れ方向の長さが長いほど土砂流出軽減効果が高い。

図5には、豪雨時において各試験区で発生した流出土砂の粒径クラス別の流出土砂量を示す。草生帯の土砂流出軽減効果は土砂の粒径クラスによって異なる傾向を示していることが分かる。すなわち、0.02mm以上の粒径クラスに対する土砂流出軽減効果は草生帯の長さにかかわらず高く、0.002～0.02mmの粒径クラスに対する土砂流出軽減効果は草生帯の長さが大きいほど高くなる。一方、0.002mm以下の粒径クラスには土砂流出軽減効果がみられない。この結果は、国頭マージ土壌からなる裸地領域からの流出土砂には0.002～0.02mmの粒径クラスの土砂が多く含まれていることから、このような土砂流出に対する草生帯の流出軽減効果を高めるためには草生帯の流れ方向の長さを広くすることが必要であることを示唆している。

表2 現地試験結果に基づく草生帯の土砂流出軽減率

観測期間	裸地区の 総流出土砂量 (kg)	草生帯の土砂流出軽減率(%)		
		0.5m	1.5m	3.0m
2002.6.12-12.15	95		51	
2003.6.3-12.3*	114		54	72
2004.6.14-12.8	160	31	38	

*2003.8.15-9.9 欠測

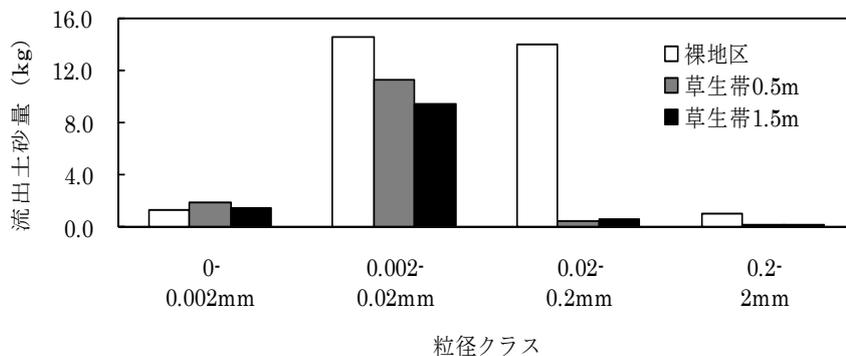


図5 粒径クラス別の流出土砂量 (2004年10月18～20日、総降雨量140.0mm)

4. 赤土流出軽減特性の解析（塩野ら、2009）

草生帯の土砂捕捉過程を再現する数理モデルを用いた解析を行って、センチピードグラスを用いた草生帯の土砂流出軽減率と諸因子との関係を明らかにした。草生帯の土砂流出軽減率を求めるためのシミュレーションでは、現地で想定される草生帯の流れ方向の長さ、地形勾配、草生帯上流側の表面流出水の流入流量および土砂濃度をモデルに入力して数値計算を行い、草生帯を通過した表面流出水の土砂濃度を算出した。算出された土砂濃度を草生帯上流側の土砂濃度と比較して、土砂流出軽減率を求めた。

草生帯の土砂流出軽減率への影響度が高い因子を明らかにするための感度分析結果によると（図6）、土砂流出軽減率は、流水の流れ方向の草生帯の長さや草生帯に流入する表面流出水の流量を変動させた場合に大きく変動する。一方、流入する表面流出水の土砂濃度と地形勾配の変化による土砂流出軽減率の変動範囲は小さい。よって、流水の流れ方向の草生帯の長さや草生帯に流入する表面流出水の流量が、土砂流出軽減率に大きな影響を与える因子であると判断される。

次に、土砂流出軽減率と上述の2因子（流水の流れ方向の草生帯の長さや草生帯に流入する表面流出水の流量）との関係を図7に示す。土砂流出軽減率は、草生帯の流れ方向の長さの増加とともに増加している。このことは、表2に示した現地試験結果と同じ傾向である。また、土砂流出軽減率は、草生帯に流入する表面流出水の単位幅流量が増加すると減少するという傾向がみられた。

草生帯の流れ方向の長さの増加分に対する土砂流出軽減率の増加割合は、草生帯の流れ方向の長さが増加すると低下し始め、単位幅流量が小さい場合、長さが3m以上ではわずかとなる。本シミュレーションでの設定条件では、土砂流出軽減のためのセンチピードグラスを用いた草生帯の効率的な設置長さは3m程度までが効率的であると判断される。実際に草生帯を設置する場合には、ここで述べた技術的な知見に加えて、農家等の意見も踏まえて仕様等を決定することが必要であろう。

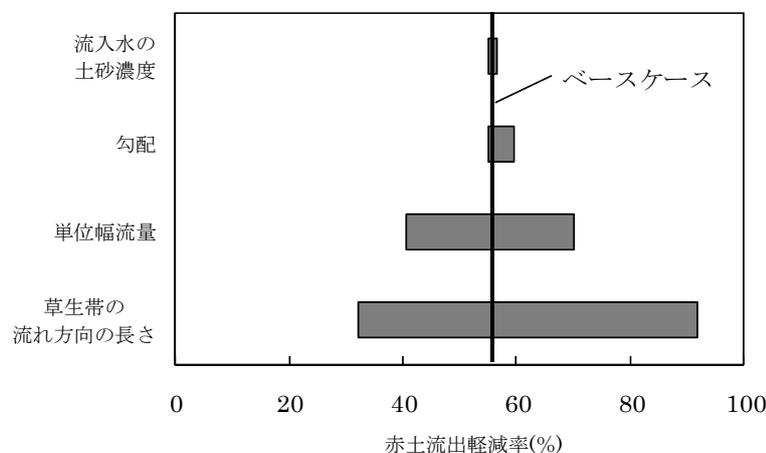


図6 草生帯の土砂流出軽減率に関する感度分析結果

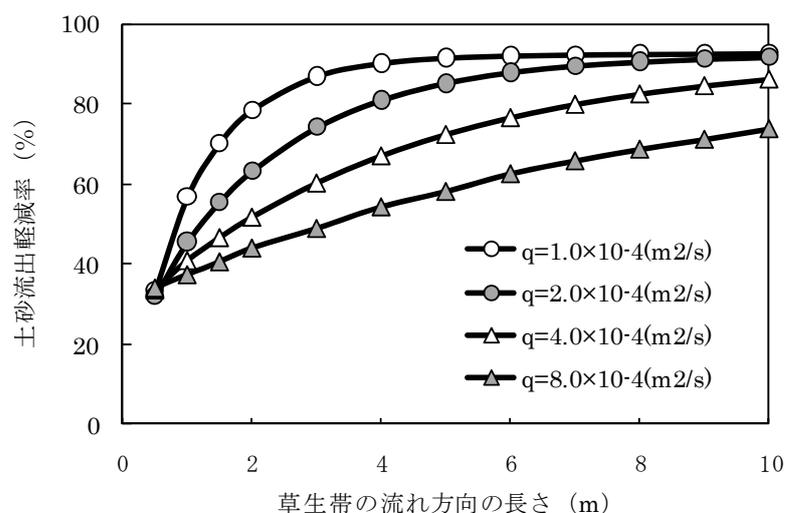


図7 草生帯の流れ方向の長さ と土砂流出軽減率との関係

5. サトウキビ栽培圃場における赤土流出対策の有効性と負担（塩野ら、2007）

サトウキビ栽培圃場における草生帯の赤土流出対策の有効性と負担に関する調査を行った。調査は、上述の観測試験区で行った。2つの試験区でサトウキビ（品種：Ni15）の春植え栽培を行い、一方の試験区の下流に流れ方向の長さが0.5mの草生帯を設置した「対策区」、他方を「慣行区」とした。2005年3～12月にかけてこれら2つの試験区の流出土砂量を観測した。観測期間の総流出土砂量は対策区が5.8t/ha、慣行区が18.3t/haであった。慣行区と対策区の総流出土砂量を比較して求めた草生帯の土砂流出軽減率は68%であった。また、0.02mm以下の細粒土砂に対する草生帯の流出軽減率は69%であった、これらの結果は、草生帯による赤土流出対策の有効性を示唆している。

試験期間中、草生帯の草高は7.5cmを維持し除草作業は必要としなかった。また、センチピードグラスがサトウキビ栽培領域へ進入する様子はみられなかった。一方、対策区内のサトウキビ栽培領域の下流部では、草生帯の設置に伴う排水不良が観察され、サトウキビ初期生育への悪影響が懸念された。しかし、生育初期段階（5～7月）における茎数、収穫時における原料茎数、原料茎長、一茎重および圃場ブリックス（糖度の目安値）の調査結果に、この排水不良が原因とみられる影響は現れなかった。これらの結果は、本対策の実施によって草生帯の管理や追加的な営農作業がほとんど発生せず、また、サトウキビ生育に対して悪影響がほとんど生じないことを示唆している。

そこで、本対策法の実施により発生する負担は、草生帯の設置と撤去費用、耕作面積減少にともなう減収分と考え、対策による負担費用の試算を行った（表3）。ここでは、草生帯は春植え栽培開始時に設置して次回の改植までの4作（春植え1作、株出し3作）の期間使用すると仮定した。本対策の負担費用は3,700円/10a/作と試算された。この金額はサトウキビの粗収益（124,500円/10a）の3%に相当する。

表3 草生帯による対策の負担費用の試算例 (円/10a)

項目	金額	備考
草生帯設置費	6,800	種子費 3,800 円/10a, 人件費 3,000 円/10a
耕作面積減による減収分	3,200	4 作分 (春植え 1 作と株出し 3 作), 1 株/畝減少すると仮定, 収益は農林水産省大臣官房統計部 ⁷⁾ に基づく
草生帯撤去費	4,900	薬剤費 1900 円/10a, 人件費 3,000 円/10a
合計負担費用	14,900	4 作 (春植え 1 作と株出し 3 作) の合計
1 作あたり負担費用	3,700	

6. 今後の課題

今回の検討では、センチピードグラスによる草生帯は赤土流出軽減に効果的であることが示された。また、草生帯の管理作業は発生せず、草生帯設置によるサトウキビ生育への悪影響は見られなかった。対策に係る負担としては、設置および撤去に係る負担費用が発生すると試算された。今後普及を図っていくには、現場での設置事例を増やして、実践場面での問題点の抽出やその対応について取り組んでいく必要があるだろう。

IV. おわりに

土壌侵食対策を進めるには、負担の少ない対策技術の開発、実施する農家の協力、負担軽減などを支援するしくみとしての地域活動や公的支援制度などの運用が必要であると考えられる。これらを進めるには、農家、地域、行政および研究機関等が土壌侵食対策について一層関心を高め、各々どのような役割を担うのが望ましいかを議論していく必要があるであろう。

参考文献

- 1) 農林水産省構造改善局計画部 (1992) 土地改良事業計画指針「農地開発 (改良山成畑工)」、158-178.
- 2) Shiono et al. (2002) Soil Loss Estimation on a Local Scale for Soil Conservation Planning, JARQ, 36(3), 157-161.
- 3) Shiono et al. (2007) Performance of Grass Strips for Sediment Control in Okinawa, JARQ, 41(4), 291-297.
- 4) 塩野ら (2007) 草生帯およびソバ栽培導入による営農的赤土流出防止対策、農業農村工学会誌、75(9)、25-28.
- 5) 塩野ら (2009) センチピードグラスを用いた草生帯の赤土流出軽減効果、畑地農業、612、18-25.

- 6) Wischmeier and Smith (1978) Predicting rainfall erosion losses; a guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook, No.537, 1-58.

著者紹介

塩野 隆弘 (しおの たかひろ)



経歴

平成元年 北海道大学農学部農業工学科 卒業
農林水産省 農業工学研究所
平成 13 年 独立行政法人農業技術研究機構
九州沖縄農業研究センター
平成 19 年 (独) 農研機構 農村工学研究所
平成 22 年より (独) 農研機構 農村工学研究所
農地・水資源部 農地工学研究室長

USLE に含まれない土の性質と土壌流亡

東京大学大学院農学生命科学研究科生物・環境工学専攻 西村 拓

I. はじめに

世界人口は今後も増加する傾向にあり、局所的には飽食な生活をおくる地域が少なからずあるが、世界レベルで考えると、食料の持続的生産、増産は世界的にみて重要な課題である。これに対して、侵食による農地の生産性の低下、農地の荒廃は世界各地で深刻な問題になっている。Lal (1998)は、世界レベルの推定で、侵食によって、穀物で 10%、大豆で 5%、根菜で 12%、豆類で 5%の生産損失があるとしている。穀物の世界市場では、各年度期の末在庫が 10%程度低下するだけで供給が逼迫し、価格の高騰が生じるため、侵食が量・価格の面で食糧供給に与える影響は小さくない。

コーンベルトと呼ばれる米国中西部のイリノイ、インディアナ、アイオワ各州では 3 州あわせて 22 万戸の農家が約 3000 万 ha と日本よりも若干小さい位の耕地面積(アメリカ農務省 農業統計 2007)で 3000 万 t の食用トウモロコシ(1200 万 ha)、2800 万 t のダイズ(1000 万 ha)を生産をしている。これらに小麦を加えると、3 作物による粗収入が毎年 30 兆円程度になる。コーンベルトの土壌はプレイリー土壌として有名な生産性の高い黒土である。広大な圃場はかならずしも平坦ではなく、圃場中の起伏に沿って生じる地表面流出水によってインターリル浸食(シート浸食)、リル浸食が生じる。1980 年代前半、この地域では平均で $18.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 程度の水食(アメリカ農務省 2003)とそれに伴う生産性の低下が生じていた。これに、同地域の耕地面積を乗じると年間 5.6 億 t という流亡土量になり、畑地表土を資源と見なし、客土材の単価(たとえば 1.5 万円/t)を乗ずるとこの中西部 3 州だけで 8.2 兆円という莫大な金額に相当する。この問題に対し、1985 年農業法(Food Security Act 1985)で実施された土地保護プログラム(CRP, Conservation Reservation Program)、1990 年の食料、農業、保全および貿易に関する法(Food, Agriculture, Conservation and Trade Act)といった政策的対応によって 2003 年時点で土壌流亡が平均で $12.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と 1980 年代初めの 3 分の 2 まで侵食が減少した。米国全国では、2007 年度 1 年間で 207 百万トンの土砂、20.4 万トンの窒素分、4.6 万トンのリンの農地からの流出を抑制し、結果として 5000 万トンの CO_2 の排出抑制に貢献したと推定されている(アメリカ農務省、<http://www.nass.usda.gov/>)。

このような土壌保全成果を支える技術の一つに各種営農行為や土壌保全行為、自然条件(土壌、降雨)による侵食量の多寡を推定する USLE(RUSLE)がある。USLE の詳細は別項にゆずるが、簡単には、 $A(\text{年間侵食量})=R \times K \times LS \times C \times P$ という形式の実験式である。R は、降雨強度、降雨エネルギー等を考慮した雨の侵食作用を表す項で、K は、標準的な区画(斜面長約 22m、傾斜約 9%、裸地)における侵食量を反映する各土壌に固有の因子である。LS、C、P は、圃場の形状(斜面長、傾斜)や作物種、営農行為や保全行為を反映する項で 0 から

1 の値をとる。アメリカ農務省のマニュアルでは、米国内で蓄積したデータに基づいたパラメータを設定している。気候(降雨の性質)や土壌が異なる地域では米国内と同様の結果が得られる保障がないため、日本や中国、タイ王国、アフリカなどで、必要なパラメータを独自に決定している例がある。

USLE は非常に工学的なアプローチであるため、入力可能なパラメータ (R, K, LS, C, P) とターゲットである「土壌流亡」の関係のみに注視し、水食に不可欠な降雨中の地表面流出水の発生やその多寡については考慮していない。また、一年間の流亡土量を目的関数としているため、春先のみに生じるような侵食、雨季に先鋭的に生じる侵食といった特定の時期やプロセスで発生する侵食については不十分である(ただし、改良版の RUSLE2 では、K 値の年変動が多少考慮されている)。

本稿では、USLE に含まれていない侵食過程、具体的には土壌の含有する粘土画分の特性に左右される水食過程と土壌の凍結・融解が関連する水食について話題提供する。

II. 土壌粘土の影響

USLE の K 値(対象土壌の受食性パラメータ)は、圃場試験で実測することが望ましい。しかし、圃場実験は多くの時間、労力を要するため、アメリカ農務省が出しているモノグラフでは、**図 1** のように土性が決まると対象土壌の K 値が得られるとしている。モノグラフは、入手可能な情報を用いた侵食量の予測を目的としており、単純化のため、土壌の状態の時空間変動については、考慮していない。しかし、降雨の浸入・流出やそれに伴う土壌流亡は、必ずしも土性のみによって決まるわけではない。

たとえば、**図 2** に例を示したように同じ土壌であっても、降雨開始時の土壌水分条件によって降雨の浸入が変わることがある。これは、降雨の地表面流出と侵食量も降雨開始時の土壌条件によって変わり得ることを示唆している。一般に、「乾いた土はよく水を吸う」と考えることが多いが、**図 2** では逆に初期に乾燥している土壌は、降雨開始後速やかに浸入速度が低下し、降雨に先行して 15~24 時間湿潤状態で養生した土壌が相対的に大きな浸入速度を示した。これは、降雨下に地表面付近で土壌の分散、土壌間隙の閉塞といった土

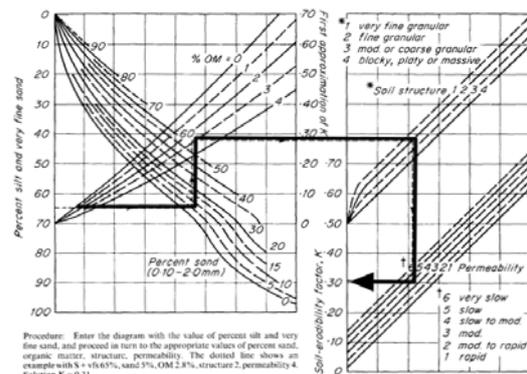


図 1 粒度分析結果他から K 値をもとめるモノグラフ (図中の→は例)

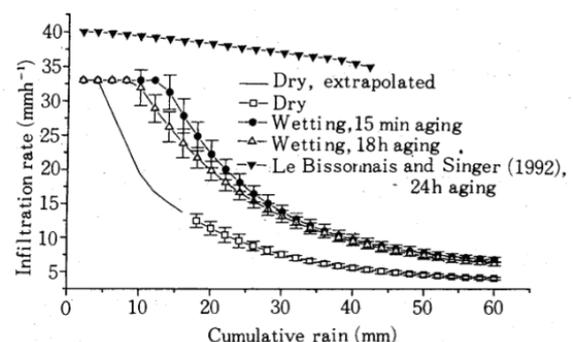


図 2 初期水分と降雨の浸入の関連 (Levy at al. 1997)

壤構造の変化とそれに伴う透水性の変化が生じるためである。この土壤構造の変化の典型的なものが降雨による土壤クラストの形成である。西村ら(1990)は、クロボク土を用いて実験を行い、降雨時の土壤クラストの形成によって、透水性の高いクロボク土においても降雨中に地表面流出と土壤流亡が発生することを示した(図3)。図4は、実際の圃場表面に形成した土壤クラストとリル開始点の写真である。

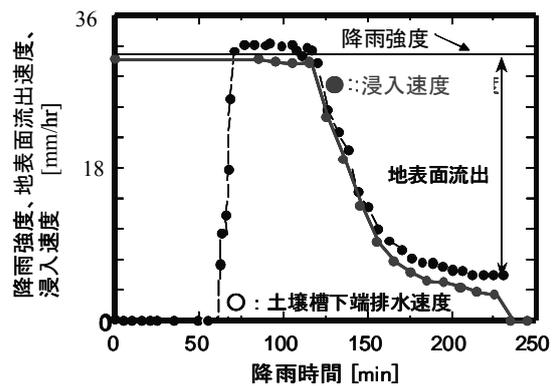


図3 クロボク土における降雨の浸入・流出(西村ら、1990)

1. 粘土粒子の分散凝集と水食

降雨中の土壤クラストの形成は、土壤構造、団粒の安定性によって左右される。さらに、土壤団粒の安定性は、土壤を構成する粘土鉱物種と粒子を結びつける有機物等の膠結物質の多少に影響される。

けん濁液中の粘土粒子は、けん濁液に含まれる電解質(水溶性塩類)の濃度によって振る舞いが変わる。一部の例外を除いて多くの粘土鉱物は、負の電荷を持つため、特に塩由来の陽イオンの種類や濃度が重要になることが多い。

粘土粒子がけん濁液中でバラバラに分散し続けるか、それともお互いに結合して塊(凝集体)を作るかの境界となる電解質濃度を臨界凝集濃度(Critical Coagulation Concentration, Critical Flocculation Concentration)と呼び、頭文字をとって、CCCまたはCFCと略称することが多い。粘土けん濁液の電解質濃度がCCCよりも高い(濃い)場合、粘土粒子は凝集、沈殿する。河川を流下した濁水が海水域に流れ込んだとたんに海底に沈殿するのは、これの典型である。

土壤団粒の安定性を考えるとき、降雨の電解質濃度が土壤を構成する粘土鉱物のCCCよりも高ければ団粒は安定し易い。逆に、CCCよりも低くなると、団粒は崩壊、分散しやすい状態となる。室内実験で湿式団粒試験を行う際、使用する水を水道水(通常 10~20 mmol L⁻¹程度の電解質を含む)にした場合に比べて蒸留水にした場合に、団粒の崩壊が増え、

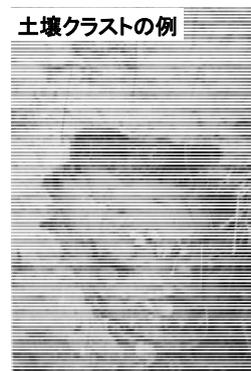


図4 圃場における土壤クラスト形成例

表1 主な粘土鉱物の臨界凝集濃度

粘土鉱物	塩の種類	CCC (mmol L ⁻¹)
モンモリロナイト	NaCl	7-20
	CaCl ₂	0.13-0.5
イライト	NaCl	9-55
	CaCl ₂	0.13-1.0
カオリナイト	NaCl	5 (pH=7)
	CaCl ₂	0.4 (pH=7)
クロボク土抽出粘土画分	NaCl	13-26
	CaCl ₂	8.7-20

土のコロイド現象(2003)より

耐水性団粒が減ることによってこの現象を確認することができる。多くの場合、自然降雨水に含まれる電解質濃度はかなり低いので、自然降雨下では、団粒は壊れやすい状態にあると考えられるべきである。

主要な粘土鉱物のCCCを表1に示した。同じような土に見えてもカオリナイトを多く含む土は、比較的凝集しやすく、イライトやモンモリロナイト(ベントナイト)を多く含む土は分散しやすい。濃度だけでなく、電解質の種類についても、Na, Kのような一価の陽イオンを含む場合に比べて二価の陽イオン(Ca や Mg)を含む場合に凝集しやすい状態になることが知られている。表1を解釈すると、畑地に散布する塩類(肥料)のうち、K やアンモニア(NH₄⁺)といった一価の陽イオンは、降雨下の土壌団粒弱体化を招くリスクがある。Ca や Mg には逆に団粒を安定させる効果が期待できる。

図5は、リン酸肥料製造時に排出されるリン酸石膏を畑地に散布した時の地表面流出と土壌流亡抑制効果を示した例である。降雨中のリン酸石膏の溶解によって地表面近傍の土壌水の電解質濃度が高く(また陽イオン種も二価で)維持され、その結果、団粒構造や透水性が維持されたと考えられる。さらに、団粒が分散せずに団粒のまま存在するため、地表面流出水が発生しても土壌の流亡が少ない結果となった。

2. 小括

同じ土性であっても、粘土画分を構成する粘土鉱物が異なると、降雨下における土壌構造の安定性、透水性が異なる。さらに、土壌構造、透水性の違いは、地表面流出、流亡土量の違いに繋がる。広く使われているUSLEは、このような粘土粒子の特性に由来する侵食性の違いは考慮していない。地形や母岩が多様な日本においては、近接している地域であっても粘土鉱物が異なることが多い。また、農地への客土によって特定の圃場が周囲と異なる粘土鉱物を含むこともある。土壌流亡、農地保全を考える際に、USLEでは説明できないような不思議な現象が現われる可能性があることを忘れるべきではない。

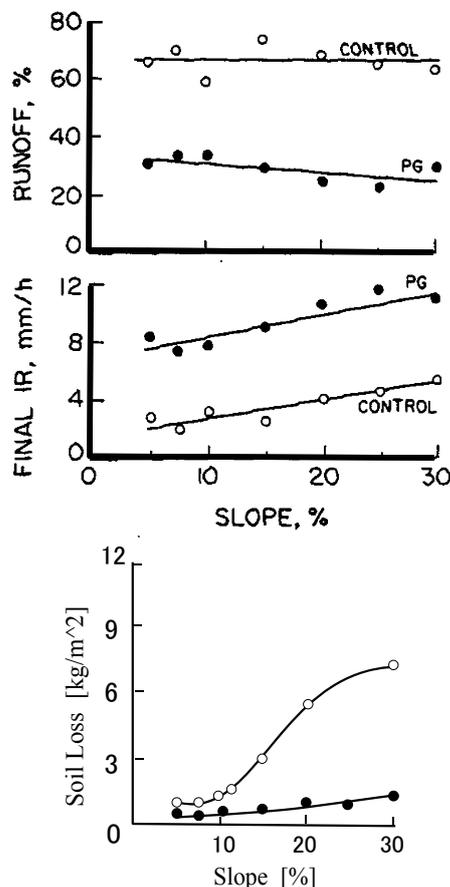


図5 石膏の散布による地表面流出、土壌流亡の抑制(Warringtonら1989)。図中CONTROLが石膏なし、PGがリン酸石膏散布区

Ⅲ. 土壌の凍結・融解と水食

冬季に気温が非常に低くなる内陸の乾燥地や標高の高い地域では、冬季に終日気温が 0°C を下回る日が続き、その結果、季節凍土が形成する。季節凍土は早春に地表面近傍だけ融解した部分融解凍土になる。部分融解凍土の地表面は融解しているが、下層では凍結によって透水性が低下したままであるため、融解水や融雪水、降雨、灌がい水が下層へ浸透できずに地表面近傍を横方向に流れ、この側方流によって侵食が生じることがある。以下では、厳冬季に凍土が生じる群馬県嬭恋村の土壌を対象に、人工降雨装置を用いた室内実験によって、土壌の間隙構造と水分量が春季に部分融解した凍土の受食性に与える影響を検討した。

1. 実験方法

群馬県嬭恋村のキャベツ畑で採取した黒ボク土（2 mm 篩通過分）を供試土とした。供試土は内寸 50 cm×10 cm×10 cm の透明塩化ビニル製土槽に充填した。土槽には、地表面流出水を採取するフリュームに加え、下流端の地表面から深さ 2 cm, 8.5 cm の位置に浸出水採取孔、底部下流端に下部排水採取孔を設けた。

表層 2 cm が融解土を模擬した非凍土層で、下方の 8 cm 厚が凍土層である。まず、水分調整した厚さ 8 cm の模擬凍土層を作成した。初期体積含水率が 20%, 40% のものは充填前に水分調整したものを充填し、60% のものは、体積含水率 40% の土を充填後、一旦毛管飽和してから余剰水を一昼夜排水して水分量を調整した。8 cm 分の土層を充填後、 -30°C の大型冷凍庫で凍らせ、その後、 -5°C の恒温室内に静置して、初期温度条件とした。降雨開始直前に冷凍庫から出し、土壌槽の壁面外部を断熱材で覆った後に、非凍土を乾燥密度 0.60 g cm^{-3} 、体積含水率 40% で厚さ 2 cm 分詰め、非凍土層充填終了後、速やかに人工降雨装置を用いて降雨を与えた。降雨強度は 42 mm hr^{-1} である。

降雨中、地表面流出水、土壌槽下流端深さ 2 cm, 8.5 cm の浸出水、土壌槽底面からの排水（下部排水）を採取した。地表面流出水中の流亡土量は、降雨後炉乾、計量して求めた。土壌槽内には熱電対を埋め込み、実験中の温度変化を記録した。土壌槽の傾斜は 8° 、反復は 2 回とした。

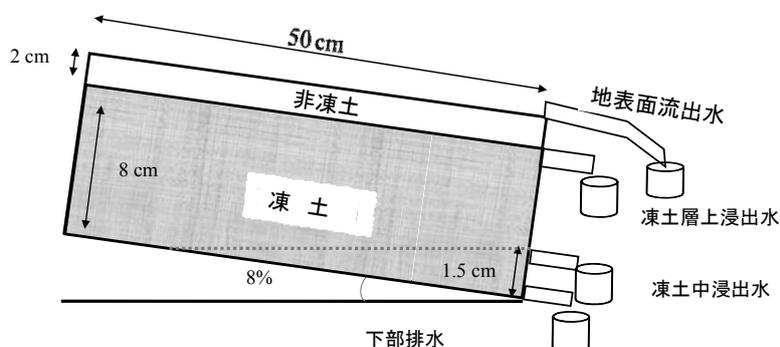


図 6 実験で使用した部分融解凍土槽模式図

表 2 凍土層の充填および水分条件

含水率 (θ_i ; %)	乾燥密度 (g cm^{-3})
20, 40, 60	0.50, 0.60, 0.70

2. 結果

(1) 部分融解凍土の地表面流出

乾燥密度 0.60 g cm^{-3} で充填した試料の降雨中の地表面流出の経時変化を図 7 に示す。 θ_i は、凍結前の水分で含水率と同じものとする。また、 $\theta_i=40\%$ で凍土層の充填乾燥密度を $0.5, 0.6, 0.7 \text{ g cm}^{-3}$ と変えた場合の結果を図 8 に示す。乾燥密度の増減は農業機械の踏圧による圧縮や耕起による膨軟化を模擬したものである。

図 7 で $\theta_i=40\%, 60\%$ の場合、降雨開始後 15 分位に降雨の大半が地表面流出水となった。このとき、降雨量と地表面流出量の差から算出した土壌内部における水貯留量は、表層 2cm の非凍土層の間隙体積量とよく一致した。 $\theta_i=60\%, 40\%$ の場合、凍土層でほとんどの間隙

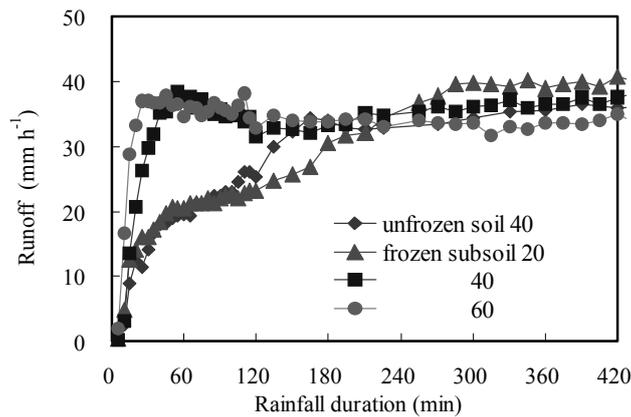


図 7 凍土層の初期水分(初期含水率)が降雨中の地表面流出、土槽下部排水に与える影響。
($\rho_b = 0.60 \text{ g cm}^{-3}$, 図中の数字は含水率)

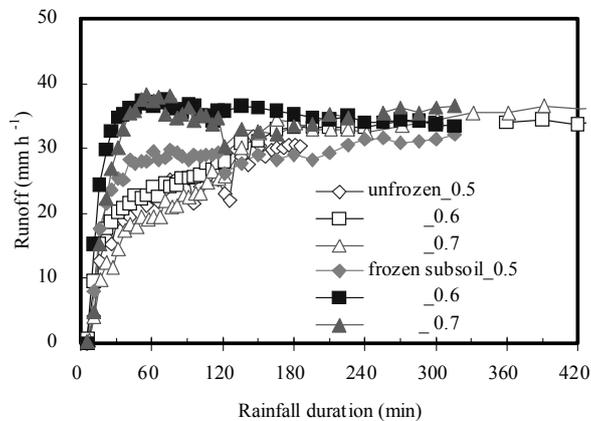


図 8 凍土層の乾燥密度が降雨中の地表面流出、土槽下部排水に与える影響。
($\theta_i = 40\%$. 図中の数字は下層土(深さ 2~10cm)の充填乾燥密度)

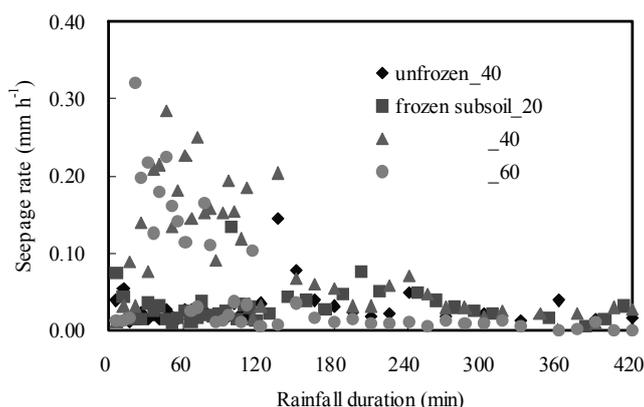


図9 土壌層下流端からの浸出水流出速度. 図中のデータは, 深さ 2cm の結果と 8.5cm の結果の和. 図中の数字は下層土の含水率. 下層土の充填乾燥密度は, 0.7 g cm^{-3} .

が氷で満たされているため, 降雨は凍土層へ浸潤せず, 凍土上に貯留し, 表層の非凍土層の間隙体積を越えた分が流出したと考えられる. 他方, $\theta_i=20\%$ の試料と対照実験として行った非凍土の場合, 地表面流出が降雨時間と共に徐々に増え, 非凍土では 3 時間位, $\theta_i=20\%$ の場合は 5 時間位で定常な地表面流出速度に達した. 別途行った透水試験では, 乾燥密度 0.6 g cm^{-3} の時, 非凍結土や $\theta_i=20\%$ の凍土は 50 mm hr^{-1} 以上の浸入能を示したが, 降雨下では, 42 mm hr^{-1} よりも浸入能が低くなっていたことがわかる. 図8において, 下層土が凍結していても非凍土であっても最終的には地表面流出水が発生したが, 下層に乾燥密度の高い凍土がある場合は, 降雨開始後短時間で地表面流出が発生し, それがすぐに定常流出に至ったのに対して, 下層土が非凍土だったり, 乾燥密度の小さい凍土だったりした場合は, 時間をかけて徐々に地表面流出水が増大して, 定常地表面流出に至った.

図7の $\theta_i=20\%$ および非凍土, 図8の非凍土で降雨中に地表面流出水が発生したのは, 凍土のためではなく, 降雨中に地表面にクラストが生成して透水性が低下したことが原因と考えられる. また, $\theta_i=60\%$, 40% の試料についても, 土壌温度の測定結果(未掲載)では降雨終盤(降雨開始後 6 時間以降)は十分に融解しており, この時の地表面流出は, 降雨開始直後とは異なり, 下層の凍土ではなく地表面のクラストに起因するものであったと考えられる.

(2) 凍土上を流れる浸透水の発生

図9に図7と対応して, 降雨中の深さ 2cm, 8.5cm の浸出水採取孔からの浸出水流出速度を示した. 図中には, 深さ 2cm の浸出量と 8.5cm の浸出量の和が示してある. 降雨中, 凍土は, 上から徐々に融解していく. 降雨開始直後に凍土の最上面を流下して下流端に達した浸透水が主として深さ 2cm の浸出水採取孔から出てきた浸出水であり, その後, 融解が進むにつれて, 8.5cm の浸出水採取孔からの流出も見られた. これらは, 凍土部分の透水性が小さいため, 浸潤してきた降雨水が凍土上に貯留し, 横流れした結果生じたものである. 凍土層の含水率の高いもの($\theta_i=40, 60\%$)は, 降雨開始直後に相対的に大きな浸出を示すが, 非凍土(unfrozen)や凍土であっても氷率が 20%と低いものは, 凍土層を通り抜けるた

めに、浸出はほとんど無い。すなわち、凍土層は、間隙率に対して十分含水率が高く透水性が低いときに初めて不透水層として機能すると考えられる。

(3) 部分融解凍土の侵食

地表面流出発生直後、凍土層の透水性が低い $\theta_i=40\%$ 、60%は $\theta_i=20\%$ や非凍土に比べて著しく大きい侵食速度を示した(図 10)。ここで図の縦軸に示した侵食速度は、1mmの降雨に対して単位幅(1m)の斜面から流亡する土砂量である。侵食速度は、 $\theta_i=40\%$ 、60%では、地表面流出発生時にもっとも大きくそこから漸減したが、 $\theta_i=20\%$ および非凍土層では逆に、地表面流出時には小さく、降雨時間が長くなると共に大きくなった。そして、降雨開始後6時間程度で、初期水分に依らず同程度の侵食速度を示すに至った。図 11 においても、凍土層の乾燥密度 $0.6, 0.7\text{ g cm}^{-3}$ のケースで降雨開始直後に非凍土や乾燥密度の小さいケース (0.5 g cm^{-3})に比べて大きな侵食速度が見られた。また、図 10 同様に降雨開始後6時間程度で、凍土の有無や凍土の乾燥密度に依らず同程度の侵食速度を示すに至った。

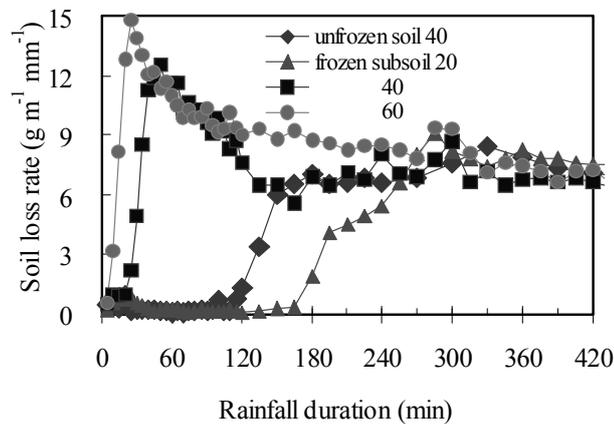


図 10 凍土層の含水率が降雨中の土壌流亡速度に与える影響 ($\rho_b=0.60\text{ g cm}^{-3}$, 図中の数字は含水率)

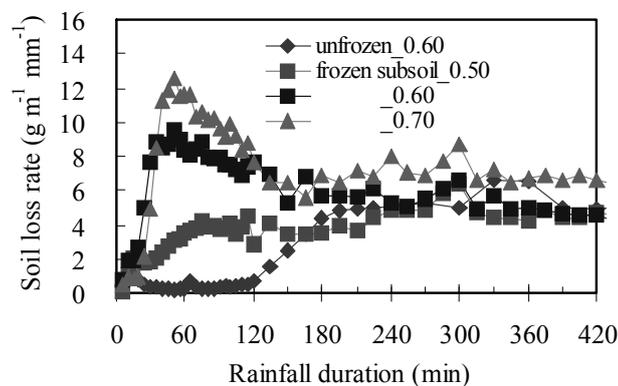


図 11 凍土層の乾燥密度が降雨中の土壌流亡速度に与える影響 ($\theta_i=40\%$, 図中の数字は乾燥密度)

この侵食速度の変化は、地表面流出発生メカニズムに起因すると考えられる。すなわち、**図 7**で $\theta_i=40\%$ 、 60% の場合と**図 8**で凍土の乾燥密度 $0.6, 0.7\text{g cm}^{-3}$ の場合は、降雨開始直後から凍土に浸入できなかつた降雨水が凍土層上に溜まって地表面流出水となつたと考えられる。凍土上面に水が溜まっていることは、この時間帯に下流端で浸出水が発生していることから確認できる(**図 9**)。このとき、表層の非凍土層の土粒子には、浮力が働き、その分侵食されやすい状態になる。他方、 $\theta_i=20\%$ や非凍土場合や $\theta_i=40\%$ 、 60% の場合の降雨終盤の地表面流出は、地表面に形成したクラストの低透水性に起因するものである。このとき、最表層のクラスト部では、クラスト層の透水性と水浸入速度によって決まるサクシオンが働いており、サクシオンの分だけ、土壌のせん断抵抗が増大する。**図 10**の $\theta_i=40\%$ 、 60% の場合と**図 11**の乾燥密度 $0.6, 0.7\text{g cm}^{-3}$ のケースで降雨開始後 60 分から 180 分にかけて、同程度の地表面流出速度(**図 7, 8**)にも関わらず、降雨時間と共に侵食速度が低下するのは、クラストの形成に伴う土中水のサクシオンの発現が原因と考えられる。

(4) 降雨流出発生要因と侵食速度の関連

降雨開始後 180 分位の間、同程度の地表面流出速度にも関わらず、降雨時間が長くなるにつれて侵食速度が漸減する現象が見られた。また、いずれの初期含水率や凍土乾燥密度においても、降雨終盤の地表面流出速度と侵食速度は同程度になった。この結果について、土壌のせん断抵抗と有効応力に着目して考えてみる。

せん断抵抗は土壌が地表面流出水による侵食に抵抗する作用の指標として考える。土のせん断抵抗は土質力学で扱うように次式で表される。

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断抵抗 (kPa)、 c は粘着力 (kPa)、 σ' は有効応力 (kPa)、 ϕ は内部摩擦角度である。ここで、同じ土壌であれば粘着力 c と内部摩擦角 ϕ は一定と仮定する。

土壌が水分飽和の場合に土粒子に働く有効応力は次式で表すことができる。

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2)$$

ここで、 σ は全応力 (kPa)、 u_w は間隙水圧 (kPa) である。浮力を考慮すると、浮力は土粒子の体積割合に水の単位体積重量を乗じたものになるので、(2)は次式

$$\sigma' = \sigma - u_w - \frac{\rho_b}{\rho_s} \gamma_w \quad (3)$$

に書き換えられる。 ρ_b は乾燥密度 (g cm^{-3})、 ρ_s は土粒子密度 (g cm^{-3})、 γ_w は水の単位体積重量 (g cm^{-3})を示す。式(3)において、間隙水と大気が地表面で平衡に達していると仮定すると、 u_w は無視できるので、次式

$$\sigma' = \sigma - \frac{\rho_b}{\rho_s} \gamma_w \quad (4)$$

に書き換えられる。

水分不飽和の場合に土粒子に働く有効応力について考える。サクシオンは次式、

$$s = u_a - u_w \quad (5)$$

で定義する。 u_a は間隙空気圧 (kPa), s はサクション (kPa) である。水分不飽和の場合、浮力は働かず、(2)および(5)より、有効応力は次式で表される。

$$\sigma' = \sigma - u_a + s \quad (6)$$

式(6)において、間隙が大気と連続していると仮定すると、大気圧と等しいと考えられ、 u_a は無視できるので、(6)式は次式に書き換えられる。

$$\sigma' = \sigma + s \quad (7)$$

式(1), (4)および(7)から、土壌内部が水分飽和のときは不飽和のときよりも、土粒子に働く有効応力が小さくなり、その結果、せん断抵抗が小さくなることがわかる(Cruise&Larson, 1977, Froese et al. 1999)。定性的には、せん断抵抗が小さくなれば、地表面流出水の物理的な条件（水深、流速など）が同一であっても侵食量が増えると考えられる(Bradford et al. 1987)。

3. 小括

一定の乾燥密度で凍土の含水率を変える条件と一定の含水率で凍土の乾燥密度を変える条件で表層に非凍土、下層に凍土を配置する部分融解凍土の実験を行った。その結果、下層に凍土がある場合でも、凍土が原因で地表面流出が発生するケースと、凍土と関係なく、地表面における土壌クラストの形成が主因で地表面流出が発生するケースがあった。土壌槽からの浸出水や土壌流亡の結果から、凍土の透水性が低いために地表面流出が生じるような場合、地表面近傍の土壌が水分飽和になると共に土粒子に浮力が働いた結果大きな侵食速度になったと考えられた。

この結果を踏まえると、低温期に凍土が生じることを防ぐことは少々困難であるが、凍土の透水性を制御することで、春先の部分融解凍土の侵食を抑制する可能性があると考えられる。すなわち、初冬の段階において、畑地の土壌水分を低く抑えるような工夫や乾燥密度を低く抑制するための耕起を行うことで凍土中に氷ではない空隙を多く残すと、翌春において、雨水や融雪水の浸透促進と表面流出、土壌流亡の抑制を期待できる。

IV. おわりに

薬も処方によっては毒になることがある。土壌保全策の立案・実施において、USLE に代表される侵食予測ツールは重要かつ有用な道具であることは疑いが無い。同時に、これらの多くは、対象と目的、立脚する仮定を明確にした工学的ツールであり、ユニバーサル(普遍的な)と称するUSLEであっても実際には、可能なこと、不可能なことがあるので、処方(限界)を意識しながら使用し、結果を吟味することが肝要である。本稿では、その例として、現時点ではUSLEにあまり考慮されていない土壌の粘土画分の寄与と凍土における侵食の特徴の二つについて紹介した。ツールの適用に際しては、その仮定、限界などについて常に配慮することが重要である。

参考文献

- 1) Bradford J.M., et al. 1987. Interrill soil erosion process: I. Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment, Soil Sci. Soc. Am. J. 51, 1566-1571
- 2) Cruse R.M. and Larson, W.E. 1977. Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact, Soil Sci. Soc. Am. J. 41, 777-781
- 3) Froese, J.C. , et al. 1999. Erosion mechanics of soils with an impermeable subsurface layer, Soil Sci. Soc. Am. J. 63, 1836-1841
- 4) Lal, R. 1998. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality, Critical Review in Plant Science 17, 319-464.
- 5) Levy G.J. , et al. 1997 Prewetting Rate and Aging Effects on Seal Formation and Interrill Soil Erosion 1 Soil Sci. 162(2), 131-139
- 6) Warrington D. , et al. 1989 Slope and Phosphogypsum's Effects on Runoff and Erosion, Soil Sci. Soc. Am. J. 53:1201-1205
- 7) アメリカ農務省農業サービス局, Conservation Reserve Program Statistics, (<http://www.nass.usda.gov/>)
- 8) アメリカ農務省自然資源保全局 2003, National Resources Inventory 2003 U.S.
- 9) 西村 拓他 1990, 室内人工降雨装置による土壌クラストの形成と侵食との関連性, 農業土木学会論文集, 146, 101-107
- 10) 取出伸夫 西村 拓, 土のコロイド現象 7章コロイド現象と水文移動現象, 学会出版センター, 2003
- 11) RUSLE2 について
http://fargo.nserl.purdue.edu/rusle2_dataweb/About_RUSLE2_Technology.htm

著者紹介

西村 拓 (にしむら たく)



経歴

昭和 62 年	東京大学農学部農業工学科 卒業
平成 3 年	東京大学農学部農業工学科 助手
平成 13 年	東京農工大学農学部地域生態システム学科 講師等を経て
平成 18 年より	東京大学大学院農学生命科学研究科 准教授

農地保全研究部会研究集会のあゆみ

開催日	テーマ	開催地（後援県）
第1回（昭和55年6月13日）	農地保全と水食	草津市（滋賀県）
第2回（昭和56年6月12日）	農地保全の諸問題	草津市（滋賀県）
第3回（昭和57年7月22日）	農地保全，その対策と研究	山口市（山口県）
第4回（昭和58年7月21日）	農業生産環境保全の課題とその対策	鳥取市（鳥取県）
第5回（昭和59年7月19日）	風土と農地保全	鹿児島市（鹿児島県）
第6回（昭和60年7月18日）	災害と農地保全	松江市（島根県）
第7回（昭和61年7月17日）	土地生産力と農地保全	金沢市（石川県）
第8回（昭和62年7月16日）	農地造成における設計施工と保全	郡山市（福島県）
第9回（昭和63年7月25日）	特殊土地地帯における地力保全	山形市（山形県）
第10回（平成元年10月24日）	国土・農村空間の総合整備と農地保全	那覇市（沖縄県）
第11回（平成2年7月18日）	緑の大地に豊かな環境・農地保全の新たなる展開	帯広市（北海道）
第12回（平成3年9月3日）	未来につなぐ豊かな大地	函館市（北海道）
第13回（平成4年9月9日）	豊かな環境の創造 急傾斜・火山灰地帯を新たに拓く	宮崎市（宮崎県）
第14回（平成5年9月8日）	自然環境の保全と活用-火山灰土壌と地下水-	熊本市（熊本県）
第15回（平成6年9月7日）	農業農村環境と水圏環境	中村市（高知県）
第16回（平成7年9月7日）	農地の保全と地すべり	池田町（徳島県）
第17回（平成8年11月14日）	農地および農道法面の保全	柳井市（山口県）
第18回（平成9年11月20日）	急傾斜地帯における農地の保全	尾道市（広島県）
第19回（平成10年10月29日）	源流地帯における農地の保全問題	岐阜市（岐阜県）
第20回（平成11年8月26日）	棚田地帯の保全と整備	長野市（長野県）
第21回（平成12年8月31日）	豊かで美しい地域環境を創る ー農地保全の新たなる展開ー	青森市（青森県）
第22回（平成13年9月6日）	湿地の活用・保全	秋田市（秋田県）
第23回（平成14年9月10日）	生態系に配慮した農地整備の新展開	鴨川市（千葉県）
第24回（平成15年9月9日）	農地整備・保全事業における農地の多面的機能について	長野市（長野県）
第25回（平成16年11月9日）	低平地における農地保全と地域資源の活用	佐賀市（佐賀県）
第26回（平成17年11月10日）	棚畑および下流地域における農地と環境の保全 ー住民参加による保全を中心にー	鹿児島市（鹿児島県）

- | | | |
|-------------------|---|-----------|
| 第27回（平成18年9月26日） | 環境と調和した農地保全 | 北見市（北海道） |
| 第28回（平成19年9月20日） | 農村景観形成における農地保全の役割 | 美瑛町（北海道） |
| 第29回（平成20年10月23日） | 中山間地における農地保全・地域資源の活用 | 松阪市（三重県） |
| 第30回（平成21年11月6日） | 世界の農地保全問題の諸相
—水土資源保全に対する技術の継承と日本の責任— | 琉球大学（沖縄県） |
| 第31回（平成22年10月7日） | 持続的農業のための農地保全 | 前橋市（群馬県） |
| 第32回（平成23年 月 日） | 中山間地域における農地保全と耕作放棄対策（仮題）
（候補） | 甲府市（山梨県） |

農業農村工学会農地保全研究部会規約

(名称)

第1条 この部会は、農業農村工学会農地保全研究部会と称する。

(目的)

第2条 この部会は、農地保全に関する基礎的研究と応用について総合的な研究、調査を支援するとともに、その進歩発展を期するものである。

(事業)

第3条 この部会は、その目的達成のために次の事業を行う。

- (1) 共同研究の奨励および調整
- (2) 研究集会および現地見学会の開催
- (3) 研究資料「農地保全の研究」部会誌の発行
- (4) その他必要な事項

(役員)

第4条 この部会に次の役員を置く。

- (1) 部会長 1名
- (2) 会計監査 1名
- (3) 幹事 原則として農地保全の調査研究に関わる試験研究・行政機関を代表する者
- 2 部会長は部会を代表する。
- 3 会計監査は部会の予算を監督し、検査する。
- 4 幹事は部会長を補佐し、部会の運営に当る。
- 5 部会長および会計監査の選出は幹事の互選とする。
- 6 部会長の任期は2年とし、再任を妨げない。
- 7 部会長は、研究集会および現地見学会の開催にあたり、役員に加えて集会幹事を委嘱することができる。

(幹事会)

第5条 この部会に幹事会を設け、規約、会務の審議および運営にあたる。

- 2 幹事会は、部会長および会計監査と監事によって構成され、部会長が必要に応じて招集する。
- 3 幹事は部会の目的に沿って、部会運営上必要な企画、事業および広報などを担当する。

(会計)

第6条 この部会の経費は、農業農村工学会の研究部会交付金および寄付金などによる。

- 2 会計年度は、毎年4月1日から翌年3月31日までとする。

(事務局)

第7条 この部会の事務局は、部会長の所属機関に置き、庶務および会計を担当する。

- 2 部会長は、事務局の職務をおこなうにあたり、事務局幹事を委嘱することができる。

附 則

この規約は昭和54年7月12日より発効する。

この規約は平成11年4月1日から実施する。

この規約は平成19年9月19日から実施する。

H22年度 農地保全研究部会幹事 一覧 (2010. 8. 04 現在)

部会長

駒村 正治	東京農業大学 地域環境科学部
-------	----------------

部会幹事

赤江 剛夫	岡山大学 大学院 環境学研究科
安中 武幸	山形大学 農学部
井上 光弘	鳥取大学乾燥地研究センター緑化保全部門
佐藤 具揮	農林水産省 農村振興局 計画部
大坪 政美	九州大学 大学院 農学研究院
塩野 隆弘	独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 農村工学研究所 農地・水資源部 農地工学研究室
小倉 力	独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター北陸水田輪作研究チーム
河野 英一	日本大学 生物資源科学部
木原 康孝	島根大学 生物資源科学部
宜保 清一	放送大学沖縄学習センター
黒田 久雄	茨城大学 農学部
古賀 潔	岩手大学 農学部
駒村 正治	東京農業大学 地域環境科学部
杉浦 俊弘	北里大学 獣医学部
斎藤 広隆	東京農工大学大学院共生科学技術研究院
酒井 一人	琉球大学 農学部
酒井 俊典	三重大学 大学院 生物資源学研究科
佐々木長市	弘前大学 農学生命科学部
佐藤 泰一郎	高知大学 農学部
高木 東	鹿児島大学 農学部
辻 修	帯広畜産大学 地域環境学研究部門
富樫 千之	宮城大学食産業学部環境システム学科
長澤 徹明	北海道大学 大学院 農学研究院
中村 公人	京都大学 大学院 農学研究科
中村 真也	琉球大学 農学部
中村 貴彦	東京農業大学 地域環境科学部

永吉 武志	秋田県立大学 生物資源科学部
成岡 市	三重大学 大学院 生物資源学研究科
西村 拓	東京大学 大学院 農学生命科学研究科
深田 三夫	山口大学 農学部
松本 康夫	岐阜大学 応用生物科学部
三原 真智人	東京農業大学 地域環境科学部
宮崎 毅	東京大学 大学院 農学生命科学研究科
山田 哲郎	独立行政法人 森林総合研究所 森林農地整備センター 農用地業務部 設計課
吉永 安俊	琉球大学 農学部

集会幹事

中村 均	群馬県農政部 農村整備課
------	--------------

事務局幹事

中村 貴彦	東京農業大学 地域環境科学部
藤川 智紀	東京農業大学 地域環境科学部

第 31 回農地保全研究部会 研究集会資料
農地保全の研究 第 31 号

平成 21 年 10 月 7 日

編集・発行者 農業農村工学会農地保全研究部会
事務局 〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1
東京農業大学 地域環境科学部 生産環境工学科
農地環境工学研究室内

Tel : 03-5477-2340 FAX : 03-5477-2620

部会長 駒村正治

庶務幹事 中村貴彦 ntaka@nodai.ac.jp

藤川智紀 t3fujika@nodai.ac.jp
