

圃場の耕起方法の違いによる地表面流発生メカニズムの解明

Study on Overland Flow Generating Mechanism at a Crop Field with Difference in Plowing Method

早川 博¹

Hiroshi HAYAKAWA

¹北見工業大学 工学部社会環境工学科 准教授

要 旨

最近の気候変動によって、北海道においても線状降雨帯や局所的な集中豪雨などによる突発的な出水が頻発している。畑作が盛んな北海道東部でもこのような集中豪雨は農家にとって貴重な財産である畑地表土を流亡させ、流亡した微細土砂は濁水となって流域末端の沿岸漁業者にも漁業被害をもたらすこととなる。本研究は降雨による表土流亡を抑制するため、耕起や大型農業機械の踏圧により形成される耕盤層の存在と表土のリル・ガリ侵食を引き起こす表面流の発生メカニズムについて現地調査を実施した。流域の畑地利用の進んでいる藻琴川流域を対象とし、約1 km²の畑地において流量、SSを観測して畑地の流出過程が示された。また、その流出過程は飽和-不飽和浸透モデルにより再現され、土壌条件や耕盤層の有無による流出への影響が明らかとなり、難透水性である耕盤層の存在が地表面流の発生を促すことが示された。

《キーワード：地表面流；表土流亡；圃場；耕起方法；耕盤層》



写真-1 耕盤層の形成



写真-2 融雪期に地表面を流下する痕跡

する地表面流の生起条件を明らかにする。

また、オホーツク海流域では、冬期間に土壌が凍結し、融雪出水期にはその土壌凍結層が不浸透層となって流出機構に影響すると考えられる。写真-2は融雪期に融雪水が秋まき小麦畑を土壌侵食している様子であり、併せて土壌凍結層を考慮した場合の地表面流の生起条件も検討した。

2. 畑地からの水・土砂の流出状況

本研究は畑地からの土砂流出現象を解明するために、藻琴川流域に図-2に示す流出小試験地（流域面積1.04 km²）を設置し、2011年から流量、SSの水文観測を開始している。ここでは試験地末端の地点Cにおける観測結果をもとに、本試験地の流出特性を示す。

2.1 融雪流出特性

本試験地では畑の融雪を促進させる融雪剤を散布しているため、4月上旬が融雪最盛期にあたり、その後徐々に流量が低減している。その際に雨を伴うと図-3に示すように流量およびSSが急激に上昇し、8,000 mg/Lに達するSSが発生している。また、2012年の融雪期では図-4のように20,000 mg/Lを超える場合もあり、耕起しただけの畑は降雨によって写真-3のように至る所で地表面流がみられる。前出の写真-2は融雪出水期の秋まき小麦圃場でのリル侵食・ガリ侵食の様子である。融雪末期の表層土壌は融解し侵食され易くなっているが、写真-2のガリ侵食流路底面はまだ凍結しており、これ以上の底面侵食は生じていない。



図-2 藻琴川流域の小試験地(流域面積1.04km²)

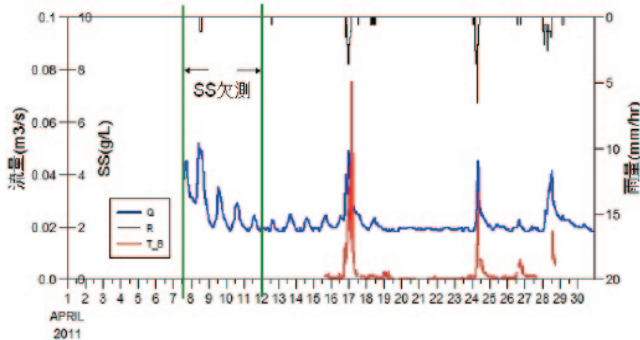


図-3 融雪期の観測結果(2011年4月)

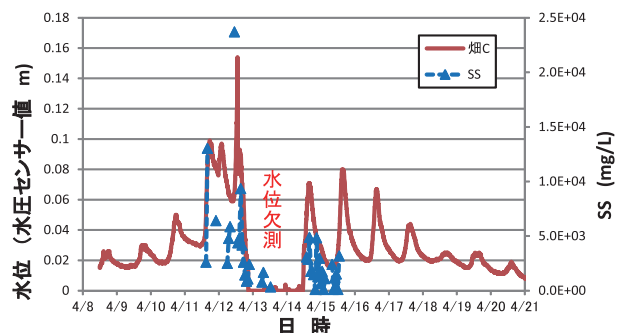


図-4 融雪期の観測結果(2012年4月)

2.2 降雨流出特性

図-5、図-6に示す夏季の降雨流出で特徴的なのは、一降雨に対して複数の流量ピークが確認できる点である。降雨ピーク直後の流量ピークは地表面流によるものであり、その後の第二ピークは土壤内に浸透した雨水の一部が早い中間流として流出したものと考えられる。畑地からの土砂流出を考える上で、降雨による地表面での雨滴侵食が無視できないものの、最初の流量ピーク直後のSSは約6,000mg/L(2012年は10,000 mg/Lを超えている)にも達しており、地表面流による面的侵食が主体的であると考えられる。この現象が長時間継続すると、地表面流が集中して写真-2のような溝状のリル侵食をもたらし、さらに畑の斜面末端部では写真-4のように侵食された土砂が扇状地状に堆積する場合も観測された。

以上のように、畑地からの土砂流出を考える上では地表面流の発生が重要であると再確認された。次章では耕盤層や凍結土壤層など表層土壤の様々な透水・排水条件における表層土壤の流出特性を把握するため、飽和-不飽和浸透流モデルによる流出解析を試みる。

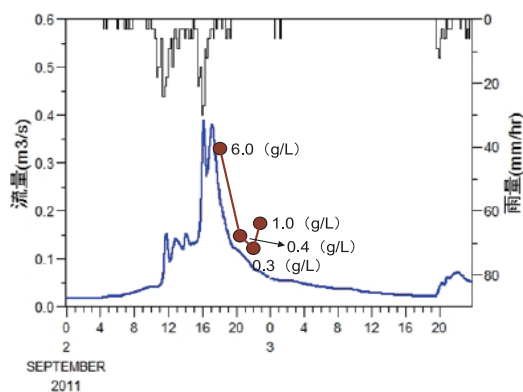


図-5 降雨流出の観測結果(2011年9月2日)

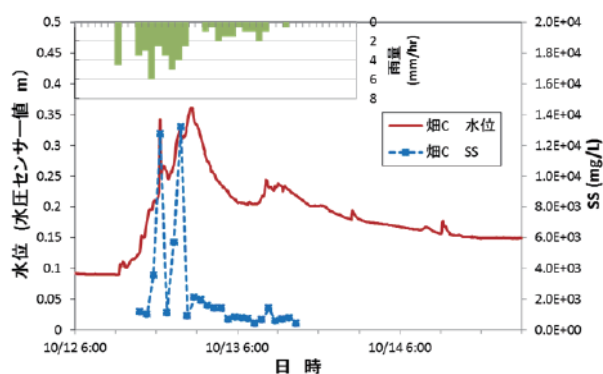


図-6 降雨流出の観測結果(2012年10月12日)



写真-3 雨を伴う融雪期の状況(2013年4月)



写真-4 小豆畑の地表面流の痕跡(2012年9月)

3. 飽和-不飽和浸透流モデル

本研究は畑地からの土砂流出を考える上で重要な地表面流の生起条件を明らかにするため、耕盤層や凍結土壤層など表層土壤の様々な透水・排水条件における表層土壤層からの流出過程を把握できる飽和-不飽和浸透流モデルを適用した。

3.1 基礎式

多孔質土壤中の水の挙動を数学的に表現するため、基礎式は不飽和に拡張されたダルシー則と連続式とを連立させた次式のRichards式である。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot K(\psi) \nabla \varphi \quad (1)$$

ここで、 θ : 体積含水率, z : 時間, z : 透水係数, ψ : 圧力水頭, ϕ : 全水頭 ($=\psi + z$) であり, z : 鉛直上向きにとった位置水頭である. $C(\psi) \equiv d\theta/d\psi$ で表される比水分容量を導入すると, 式(1)は圧力水頭 ψ ベースの式となる.

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial h} = \nabla K(\psi) \nabla \psi + \frac{\partial K}{\partial h} \quad (2)$$

さらに, $\theta - \psi$ 関係には式(3)で表されるKosugiのLNモデル⁹⁾を, $z - \theta$ 関係には式(4)のMualemモデル¹⁰⁾を適用した.

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = Q(\ln(\psi/\psi_m) / \sigma) \quad (3)$$

$$K_r = K/K_s = \sqrt{S_e} \left\{ \int_0^{S_e} \frac{dS_e}{|\psi|} / \int_0^1 \frac{dS_e}{|\psi|} \right\}^2 \quad (4)$$

ここで, z_e : 有効飽和度, θ_e : 飽和体積含水率, θ_r : 残留体積含水率, ψ_e および σ : 土壌別の変数, z_e : 比透水係数, z_s : 飽和透水係数であり, z : 余正規分布関数である. この場合, 比水分容量 z と比透水係数 z_e は次式になる.

$$C = \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\theta_s - \theta_r}{\sqrt{2\pi}(-\psi)} \exp \left[-\frac{\{\ln(\psi/\psi_m)\}^2}{2\sigma^2} \right] \quad (5)$$

$$K_r = K/K_s = \sqrt{S_e} \{ Q(\ln(\psi/\psi_m) / \sigma + \sigma) \}^2 \quad (6)$$

傾斜角 ω の矩形の鉛直2次元断面を考え, 図-7に示す計算格子を用いて計算を行った. 座標軸は斜面方向に z 軸, 斜面と直交する方向に x 軸を設定する. そうすると, 式(2)のRichards式は

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} + \sin \omega \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \omega \right) \right] \quad (7)$$

と変形できる. また, 流量フラックスは, $z=z$ を通過する流量フラックスを $q_{zD}(x)$, $x=0$ を通過する流量フラックスを $q_{x0}(z)$ とすると, 式(8)および(9)のように表記される.

$$q_{zD}(x) = \begin{cases} -K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \omega \right) & \dots \psi \geq 0 \\ 0 & \dots \psi < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$q_{x0}(z) = -K \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} + \sin \omega \right) \quad (9)$$

また, 斜面全体からの総流出量 z は, 流出高に換算すると, 次式となる.

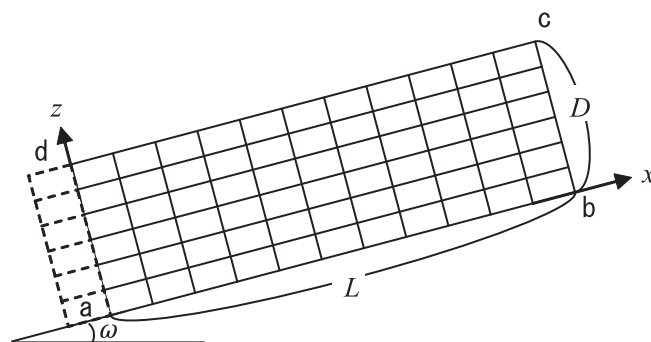


図-7 計算格子

$$q = \frac{\int_0^L q_{zD} dx - \int_0^D q_{x0} dz}{L \cos \omega} \quad (10)$$

3.2 計算条件

流出計算は、図-2の流出小試験地（流域面積1.04km²）を対象に、畑地の平均斜面長をL=100m、平均斜面勾配 $\omega=10$ 度、土層厚 $z=100$ cmとおき、土壌の現場透水試験結果を参考にして、土壌を表層（0～20cm、飽和透水係数 $z_{zz}=5 \times 10^{-3}$ cm/s）、中層（20～60cm、 $z_{zz}=1 \times 10^{-3}$ cm/s）、下層（60～100cm、 $z_{zz}=1 \times 10^{-4}$ cm/s）の3層に分けて計算を行った（Case-1）。土壌水分特性はKosugiのLNモデルのパラメータ⁹⁾を表-1に与えた。空間格子は z 方向に2m、 x 方向に10cmに設定し、境界条件は、上流端（bc面）と底面（ab面）は不透水境界とし、流量フラックスを0とした。地表面（cd面）は降水量に相当する流量フラックスを与え、表層の圧力水頭が正圧（ $\psi > 0$ ）の場合に斜面からの湧き出し量、すなわち、地表流を計算する。また、下流端（ad面）は下流端付近の流量フラックスが変化しない（ $\partial q_x / \partial x = 0$ ）条件を与え、下流端の地下水位を地表面から50cmに固定した。なお、計算手法は白木の計算法¹¹⁾を参照し、コントロールボリューム境界の透水係数の算出に土中水流動方向上流側のコントロールボリュームの圧力水頭を用いる上流法計算法を適用した。

次に、プラウによる反転耕起によって深度30～40cm付近に土壌が圧縮された耕盤層が形成されている。その耕盤層による流出への影響を調べるために、Case-2では深度30～40cmの土層を難透水性（ $z_{zz}=5 \times 10^{-6}$ cm/s）においた計算を行った。

また、オホーツク海地域は冬期間の積雪が少なく気温が-20℃を下回る少雪寒冷地域であり、畑地は積雪があっても深度40cm程度まで土壌凍結することが多い。したがって、春先の融雪期において表層付近の土壌凍結は融雪水等によって徐々に融解しているものの、それ以下はまだ土壌凍結部が残存しており、難浸透層を形成している。Case-3では、深度10cm以下の土層を難透水性（ $z_{zz}=1 \times 10^{-7}$ cm/s）において計算を行った。

表-1 斜面の幾何条件と土壌条件

幾何条件			土壌条件（表層）			
z (m)	z (m)	ω (deg)	z_{zz} (cm/sec)	$\theta_s - \theta_r$	ψ_z (cm)	σ
100.0	1.0	10	0.005	0.33	-40	1.0

4. 計算結果と考察

流出計算(1)、(2)は、2010年の最大日雨量63mm（アメダス東藻琴観測地点）を記録した8月12日の降雨を与えて、耕盤層の有無による畑地からの流出特性を考察する。直前の8月7日、8日にはそれぞれ日降水量11mmと14.5mmがあり、農地の土壌はかなり湿潤状態にあったものと予想される。2010年は試験地での流量観測が計器の不調で欠測していたため、計算の初期条件である基底流量を合わせることができなかったものの、立ち上がり時の流出高である約 $z_{zz}=0.7$ mm/hrは、平水時流量としてほぼ妥当な値である。なお、計算では、事前に土壌に一定の湿潤状態を与え、自然排水させて流出量がほぼ定常になった時点で事前降雨を与える。再度自然排水させて対象出水の立ち上がり流量まで低減した状態を計算開始の初期条件と設定した。

次に、流出計算(3)では融雪期における土壌凍結を考慮した流出特性を考察し、最後に流出計算(4)では図-5に示した2011年の観測結果を対象に本モデルの適用結果を考察する。

4.1 耕盤層を無視した場合 (Case-1)

図-8は耕盤層を無視したCase-1の計算結果である。流出の大部分は中層からの流出成分が占めており、次に表層が多く、下層からの流出がほとんどない状態である。表層の飽和透水係数 $\alpha_{s1}=5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ は180mm/hrに相当し、ほとんどの降雨は土壤に浸透することになり、土壤中を側方浸透流として流下して下流端に到達している。つまり、土壤内の水分状態は地表面流を発生させるのに必要な飽和状態に達していない。

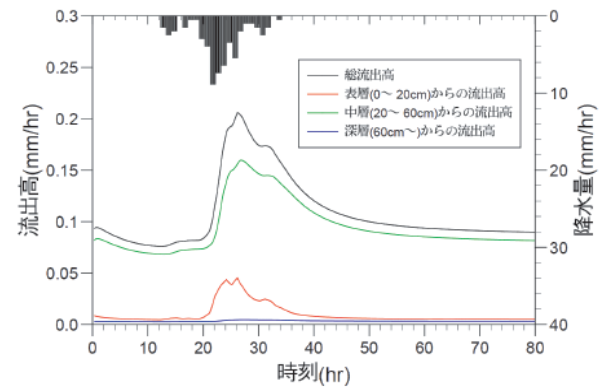


図-8 耕盤層を無視した場合の計算結果 (Case-1)

4.2 耕盤層を考慮した場合 (Case-2)

ここでは、深度30~40cmの土層を耕盤層として難透水性土層 ($\alpha_{s2}=5 \times 10^{-6} \text{cm/s}$) にした場合の計算結果を図-9に示す。表層から侵入した雨水は耕盤層によって侵入を遮断され、その間の土壤水分量が増加してCase-1よりより容易に土壤中が飽和状態に達することになる。この計算では約40mmの降雨で表層が飽和状態に達して地表面流を生起させている。地表面流が生起すると、地表にはリルが形成され、やがてガリ侵食を伴いながら大量の土砂流失を引き起こすことになる。したがって、耕盤層の存在が地表面流を生起し易くしており、心土破砕などによって耕盤層を破壊するなどの排水性の改善が必要になる。

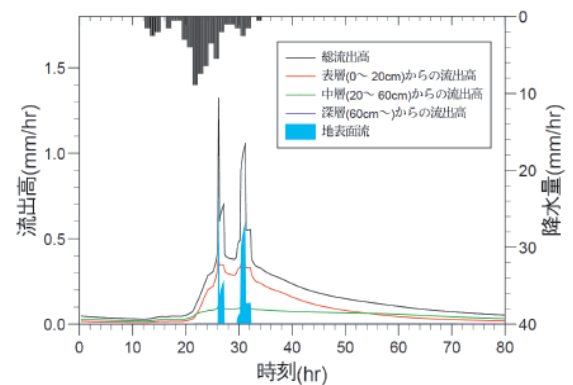


図-9 耕盤層を考慮した場合の計算結果 (Case-2)

4.3 土壤凍結を考慮した場合 (Case-3)

春先の融雪期においては、耕盤層ではなく土壤凍結層の存在が融雪流出に多大な影響を及ぼすことが考えられる。図-10は深度10cm以下が土壤凍結して難透水性土層となり、融雪水は表層10cmを流下すると仮定した場合の計算結果である。なお、計算に用いた融雪量は、流出試験地では融雪量の観測を実施

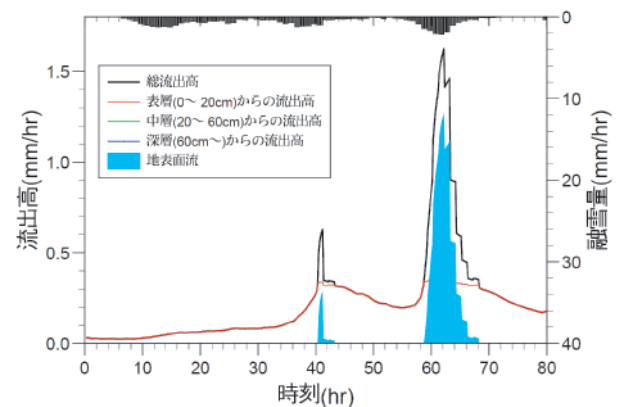


図-10 土壤凍結を考慮した計算結果 (Case-3)

していないため、同じくオホーツク海地域に属する北見市近郊の富里流出試験地¹²⁾での4月後半の観測値を与えている。時間単位の融雪量ピークが2mm/hr程度の融雪量でも3日経過後には地表面流出が生起しており、融雪流出でも容易に土砂流失が発生する可能性を示している。本流出試験地でも2011年4月の融雪期には写真-2に示したように地表面を流下したガリ侵食流路が確認されている。また、融雪期に降雨を伴った場合、写真-3の耕起しただけの地表面は至る所で水が浮いた状態にあり、表層は部分的にまだ凍土している部分と土壤が一部融解して飽和状態にある部分が混在している。このように融雪期は土壤凍結層の存在によって夏期の流出過程と異なる地表面流の発生機構であることが理解できる。

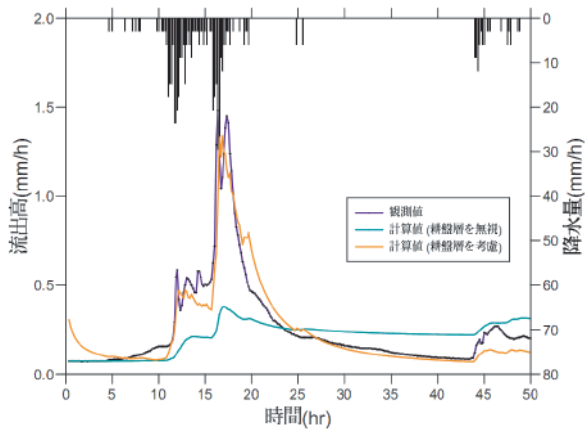


図-11 耕盤層の有無による計算値と観測値との比較

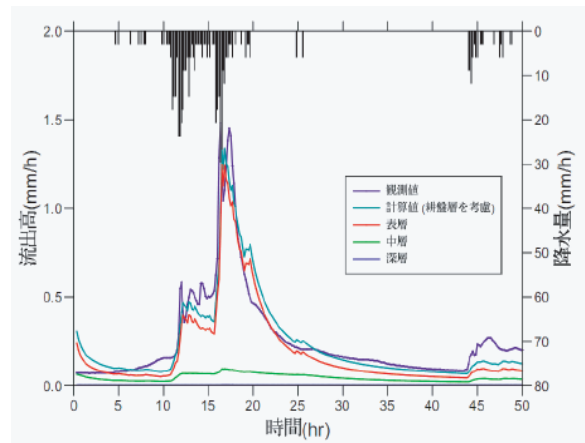


図-13 耕盤層を考慮した計算の流出成分

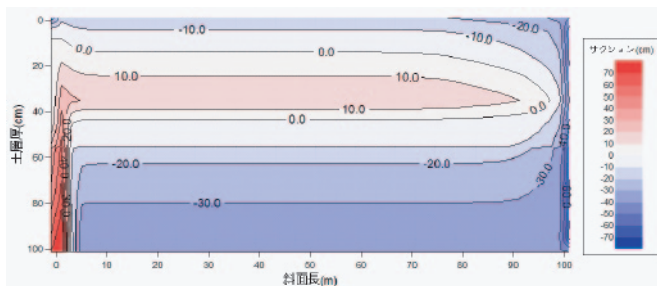


図-12 流出ピーク時の土壌層のサクシオン分布



写真-5 降雨直後の畑地(南瓜)の様子

4.4 観測値との比較・検証

図-5に示した2011年9月2日の降雨流出を対象に、ここでは耕盤層の有無による計算結果と観測値との比較結果を図-11に示す。耕盤層の存在を無視した計算では、表層土壌を浸透して中層部分で保水されるため、流域末端での流出量のピークが観測値よりかなり低い結果となった。一方、耕盤層が存在する場合は、観測値をほぼ再現している。この時の流量ピーク時点での土壌層のサクシオン分布を図-12に示すと、耕盤層より上部の表層土壌が飽和状態に達しているものの、斜面下端付近では地表面まで飽和に達していない。図-13に示す各層からの流出成分をみても、大部分が表層からの側方浸透流成分であり、計算では地表面流は発生していない。9月2日の出水後に現地に入ると、写真-3のように地表面を流れた土砂が畑地の下流端に運ばれ、堆積していた。

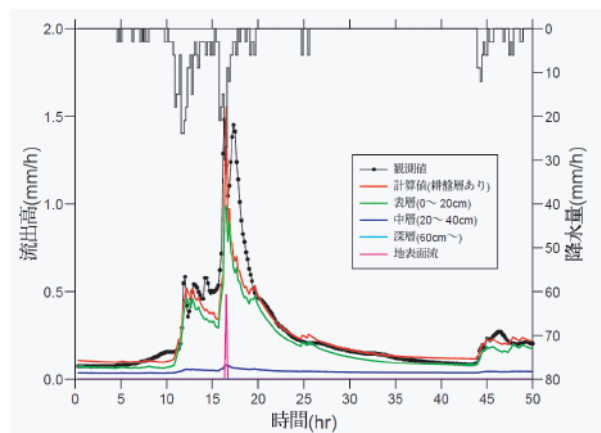


図-14 観測値と耕盤層を考慮した計算 (斜面勾配 $\omega=5$ 度)

今回設定した計算条件の斜面勾配 ω は、河道と流域界の高低差をその間の斜面長で除して $\omega=10$ 度と設定していたが、圃場整備事業では図-2のように斜面勾配を緩くするために、斜面途中で畑地を階段状に整備している。そこで、斜面勾配を $\omega=5$ 度に再設定して計算した結果を図-14に示す。斜面勾配を緩くすることによって、表層が飽和状態に達し易くなり、流出のピーク時に地表面流がより多く生起する現象を再現することができた。

6. おわりに

本研究はオホーツク海地域における畑地からの土砂流出現象を解明するために、畑地土壌層に飽和－不飽和浸透流モデルを適用し、土砂侵食を引き起こす地表面流の生起条件を検討した。その結果、以下の成果が得られた。

- 1) 畑地の反転耕起の際に形成される耕盤層が存在すると、地表面流が発生し易くなり、その結果、表層の土砂流出を促進する。
- 2) 融雪期に土壌中に残存する土壌凍結層によって、その上の融解している表層が飽和に達し、3(mm/hr)程度の融雪量で地表面流が発生する可能性がある。
- 3) 地表面流の発生条件は、降雨流出と融雪流出で土壌構造の違いにより発生プロセスに違いがあるが、地表面流が土砂侵食を誘発し、地表面流による面的侵食が主体である。

本研究の数値解析では、透水係数として飽和透水係数しか試験しておらず、不飽和透水係数は $z-\theta$ 関係、 $\theta-\psi$ 関係に既往研究成果を準用したため、流出試験地における土壌特性を反映していない問題がある。そのため、本研究での飽和－不飽和浸透流モデルによる流出計算結果は定量的な評価とすることはできないものの、畑地の種々の土壌状態における流出プロセスを定性的に把握することはできると考えられる。

また、畑地や裸地における土壌侵食プロセスは、①雨滴が地表土壌に衝突して発生する雨滴侵食、②地表面流の掃流力によって侵食される面状侵食、③地表面流が集約された細長い線状の流れによって溝状に侵食されるリル侵食、④リル侵食のリルとリルの間が侵食されるインターリル侵食、⑤小規模のリル侵食が集約して次第に排水路のような深い溝へと発達するガリ侵食、に分類される。個々のプロセスはモデル化できても、例えば畑地の地形・土壌条件や降雨条件によって地表面流の様相も異なり、土壌侵食プロセスのどの段階にあるかによって土壌侵食量が左右されることになる。したがって、本研究の観測で得られた降雨と流出量、SSの関係を踏まえ、畑地からの土砂流亡出量予測モデルを構築し、貴重な土壌を流失させ難い畑地への改良事業に結びつける計画である。

謝辞：本研究の一部は(財)北海道河川防災研究センターの平成22年度研究助成及び(一般財団)北海道河川財団の平成24年度研究助成を受けている。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 杉山一郎：北海道内降水量の非定常性と確率降水量の変動特性，北見工業大学博士論文，2007.
- 2) 気象庁気象統計情報：<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (2013/04/01).
- 3) 谷口・中川・高木・野本：網走地域における土砂流亡とその保全について，第26回農業土木新技術検討報告会要旨集，pp.78-87，2009.
- 4) 農林水産省：「土地改良事業計画指針農地開発（改良山成畑工）平成4年5月」，1992.
- 5) 秀島・大野・中村・小野寺・渡辺：火山灰土壌が分布する積雪寒冷地流域の浮流土砂流出抑止に関する研究Ⅱ．農耕地を広く抱える小流域での浮遊土砂流出の特徴，水文・水資源学会誌，Vol.15，pp.187-195，2002.
- 6) WEPP model: USDA, National Soil Erosion Research Lab, <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=10621> (2013/04/01).
- 7) 大澤・酒井・田中・島田・吉永：降雨毎の侵食予測におけるUSLEおよびWEPPの検証，農業土木学会論文集，No.232，pp.43-50，2004.
- 8) 国土交通省国土情報課：20万分の1土地分類基本調査（北海道）GISデータ，表層地質図（平面的分類図，1977），<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/download/index.html> (2013/04/01).

- 9) Kosugi, K. : Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Resour. Res. Vol.30, pp.891-901, 1996.
- 10) Mualem, Y. : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res. Vol.12, pp.512-523, 1976.
- 11) 白木克繁 : 山腹斜面を対象とした粗い空間刻みによる浸透数値計算法の提示, 水文・水資源学会誌, vol.11, pp.586-598, 1998.
- 12) 早川・松本・内島 : 少雪寒冷地における凍結土層の存在を考慮した融雪流出モデルに関する研究, 水工学論文集, 第45巻, pp.67-72, 2001.
- 13) 網走土木現業所 : 藻琴川総合流域防災河川改修工事 (排水計画) 報告書, 2009.
- 14) SWAT model : USDA, Agricultural Research Service, <http://swat.tamu.edu/> (2013/04/01).
- 15) KINEROS2 model : USDA, Southwest Watershed Research Center, <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/> (2013/04/01).
- 16) 宗村・武田・森也 : SWATモデルを用いたSS成分の流出量解析, 農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 2008.