

酪農地域における傾斜地からの 土壌流亡性評価に関する基礎的検討 —地域整備方向検討調査業務における調査研究事例—

帯広畜産大学 畜産学部 畜産科学課程 ○小林 竜也
釧路開発建設部 農業環境保全対策官 酒井 二央
株式会社アルファ技研 事業部 北條 洋史

北海道東部釧路管内浜中町の牧草地内に設置された傾斜試験枠（裸地3枠・草地1枠）からの流亡土量の測定および表層土の各種土質試験を実施し、近傍で降水量を連続測定した。その結果、草地枠からの土砂流亡は確認されなかった。同条件の裸地枠では、汎用土壌流亡量予測式（USLE）における降雨係数 R が大きい調査年で流亡土量 A は増大していた。また、耕起作業の有無が流亡土量（ひいては土壌係数 K の算出）に影響を及ぼしていた。とりわけ作土層（深さ0～10cm）における土の透水性などの物理的特性が傾斜試験枠からの流亡土量に関係していた。

キーワード：USLE、流亡土量 A 、降雨係数 R 、土壌係数 K 、耕起作業、透水係数、粒度特性

1. はじめに

北海道東部（釧路・根室管内）では、1960～1970年代を中心に大規模草地造成事業が各地で実施されてきた。その結果、農業的土地利用はもとより地域の農村景観も大きく変貌するに至った。

この間、草地造成時に起因する降雨出水時・融雪時の傾斜地からの土砂流亡のみならず、造成後の1990年代前半以降には平水時を含めた河川への栄養塩類の流出も顕在化するなど、下流域の閉鎖性水域（主に風蓮湖）の水質環境負荷を増大させる一因となってきた。一次産業間（農業・漁業サイド）では、こうした閉鎖性水域の水質環境改善に向けて長年にわたり議論を重ねる中で各種の調査研究（ひいては改善対策）が進展してきた。

沢井¹⁾は、根釧地域の農地開発に伴う河川への水質汚濁の問題点を取り上げ、周辺海域への漁業者からの要望に配慮した各種汚濁防止工事の実施例を紹介した。また、1990年代前半以降、田渕²⁾、長澤³⁾は北海道東部・酪農地域からの栄養塩類（主に平水時河川水中の硝酸態窒素濃度）の流出に関する調査研究を実施する中で有用な知見を積み上げてきた。近年では、国営環境保全型かんがい排水事業の推進を通して酪農流域の平水時河川水中の全窒素濃度が低下した報告もみられる（山崎⁴⁾）。

釧路開発建設部では釧路管内浜中町の農地再編整備を主とした国営事業を推進すべく、2022年度より地域整備方向検討調査業務「浜中地域」を実施している。今後、土砂流亡の抑制に配慮した圃場整備・排水改良等を通して、風蓮湖を含む下流域の生態系に調和した地域全体としての持続的な一次産業の展開を目指している。

他方、北海道内でも国営事業等による農地開発事業に伴い、傾斜農地や造成農地法面からの土壌侵食は以前から問題視されてきた（長澤⁵⁾、辻⁶⁾）。土壌侵食は貴重な表土の流亡による農地生産性の低下にとどまらず、下流域の生態系に負の影響をもたらす。よって、草地更新など圃場整備を実施する上で侵食流亡土量を許容範囲以下に抑制するには流亡土量の定量把握が必要となる。

侵食流亡土量の予測には、現在も世界的に広く使用されているUSLE（Universal Soil Loss Equation、汎用土壌流亡量予測式）を用いた。USLEでは、以下の6つの因子を定量化した係数の積により予測する流亡土量を算出する。

$$A = RKLSCP \quad (1)$$

A ：流亡土量（t/ha）、 R ：降雨係数（ $\text{m}^2 \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{h})$ ）、 K ：土壌係数（ $\text{t} \cdot \text{h} / (\text{m}^2 \cdot \text{tf})$ ）、 L ：斜面長係数（以下、無次元）、 S ：傾斜係数、 C ：作物係数、 P ：保全係数（ L と S をあわせて、 LS ：地形係数ともいう）

農地開発事業に伴うUSLE傾斜試験枠を用いた流亡土量の評価として後志管内（南後志地区）の事例が知られる（長澤⁵⁾）。しかし、釧路・根室地域における草地造成・圃場整備事業を含めて傾斜地からの流亡土量を具体的に定量評価した近年の事例は少ないように思われる。

そこで、この研究では北海道東部・釧路管内浜中町の牧草地内に設置したUSLE傾斜試験枠からの流亡土量の測定および表層土の土質試験を実施し、近傍で降水量を連続測定した。この結果をふまえ、酪農地域における傾斜地からの土壌流亡性評価に関する基礎的検討を加える。

2. 傾斜試験枠での調査および室内土質試験

釧路管内浜中町内の草地圃場を対象としてUSLEにおける傾斜試験枠（裸地3枠・草地1枠）を2022年春季に設置し、その近傍に転倒マス式雨量計を設置した。現地では、2022年6月～10月および2023年5月～10月の2か年にわたり降雨の侵食性および土壌の流亡性を評価した。また、2023年には傾斜試験枠内の中央部から採取した表層土（攪乱状態）の土質試験に加えて、不攪乱状態の採土を用いて透水性・保水性試験を実施した。

(1) 傾斜試験枠と現地調査

傾斜試験枠（裸地3枠①②③および草地枠④）の形状はともにUSLE標準規格（斜面長22.1m, 幅1.8m, 勾配9%）に準じて作製された（図-1）。作製時の勾配は裸地3枠①②③で8.7～8.9%, 草地枠④では5.9%であった。裸地枠では現況の地形を微修正し、上層の作土部分を表土扱いした。草地枠は現況の緩斜面をそのまま利用した。

傾斜試験枠のうち、2022年裸地3枠①②③および2023年の裸地枠①②ではレーキを用いて地表面下5cm程度の深さで地表面を適宜整地した。2023年の裸地枠③では、月1回程度の頻度でスコップを用いて10cm以上耕起した後にレーキを用いて地表面を整地した。なお、草地枠④では周辺の採草地と同様の圃場管理を実施し、両年とも年2回（7月・9月）の草刈りのみを行った。

(2) 降雨量の測定と降雨の侵食性評価

調査地点（傾斜試験枠近傍）において転倒マス式雨量計を設置し、期間中の降水量を10分間隔で連続測定した。ここで得られた降雨データをもとに降雨の侵食性（降雨係数 R ）を以下の手順で算出した。

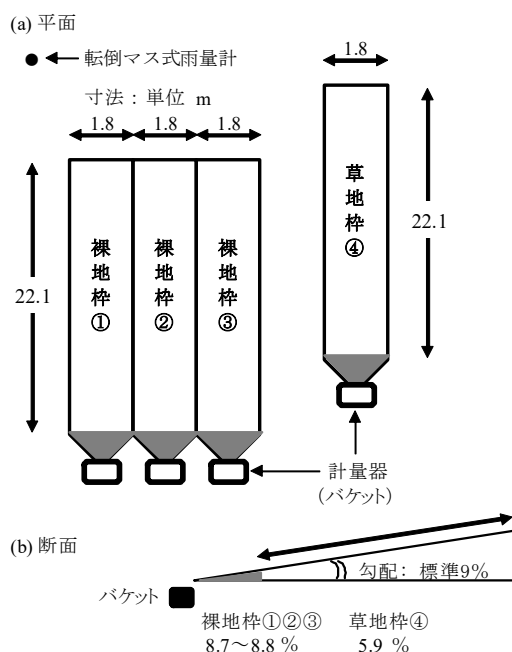


図-1 USLE 傾斜試験枠の平面的概念図

$$E_k = 210 + 89 \log_{10} I_k \quad (2)$$

$$E = \sum (E_k \cdot r_k) / 100 \quad (3)$$

$$R = \sum (E \cdot I_{30}) \quad (4)$$

I_k : 一定強度に区分された各降雨強度 (cm/h)

E_k : 降雨強度の降雨量1cm当たりの運動エネルギー
($\text{m} \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{cm})$)

r_k : 一定強度に区分された各期間の降雨量 (cm)

E : 侵食性の一連降雨の運動エネルギー
(hundred of $\text{m} \cdot \text{tf} / \text{ha}$)

I_{30} : 一連降雨の30分ピーク降雨強度 (cm/h)

R : 降雨係数 ($\text{m}^2 \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{h})$)

(3) 流亡土量の測定と土壌の流亡性評価

対象草地土壌は、浜中町内における2つの主な土壌統のうち「浜中統（褐色低地土）」に分類されていた。

調査期間中、USLEにおいて侵食性を有する一連降雨（危険降雨：降雨量12.7mm以上または最大10分間雨量4.5mm以上の一連降雨）が発生した後、それぞれの傾斜試験枠からの流亡土量を適宜測定し、調査年ごとに期間中の流亡土量 A (t/ha) を測定した。

ここで、1.で示したUSLE (1)式に ($LSCP$ を考慮した上で) 2. (2) で算出した降雨係数 R ，ここで測定した流亡土量 A を代入し、土壌係数 K ($\text{t} \cdot \text{h} / (\text{m}^2 \cdot \text{tf})$) を算出することができる。なお、3. (1) で後述するように、草地枠④からは調査2か年とも流亡土砂が確認されなかった。

(4) 土壌物理性評価

傾斜試験枠内の裸地3枠①②③の中央部付近から攪乱状態で表層土（地表面下0～5cm程度）を採取し、実験室内で空気乾燥させた後に2mmふるい（一部は0.425mmふるい）を通過させた。その後、日本工業規格 (JIS) にもとづき、土の強熱減量試験、土粒子の密度試験、土の液性限界・塑性限界試験および土の粒度試験などを実施した。地盤材料の工学的分類方法 (JGS 0051-2020) を参考に、対象草地の周辺状況・地質的背景のほか、これらの土壌を観察するなど総合的に評価した結果、裸地3枠①②③の表層土はいずれもシルト（高液性限界，MH）に分類された。

また、傾斜試験枠内（裸地3枠①②③および草地枠④）の中央部（深さ0～10cmおよび10～20cmの位置）における土壌を100cm³ステンレス試料円筒（採土管）を用いて不攪乱状態で採土した。実験室に搬入した後、土の飽和透水試験（変水位）および土の保水性試験（pF試験：土柱法・遠心法）をJISに準じて実施した。

さらに、2. (3) で傾斜試験枠（裸地枠①②③）から実際に流亡した土の粒度試験を実施し、圃場管理作業の違い（耕起の有無）が流亡土砂の粒度特性に及ぼす影響についても若干の検討を加えた。

3. 結果および考察

(1) 降雨の侵食性評価

2. (3) で前述したように、USLEでは、一連の降雨量が12.7mm以上または最大10分間雨量が4.5mm以上のものを侵食性の降雨（危険降雨）と判定している。

調査2か年に観測された侵食性の一連降雨の回数、期間降水量、降雨係数 R をみると、2022年には11回、493.5 mm、 $R = 145.8 \text{ m}^2 \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{h})$ 、2023年には17回、360.5 mm、 $R = 82.8 \text{ m}^2 \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{h})$ であった（表-1(a)(b)）。

表-1 危険降雨と降雨係数 R の算出

(a) 2022年 一連降雨 期間（月日～月日）	一連 降雨量 (mm)	$E \cdot I_{30}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{tf}$ / $(\text{ha} \cdot \text{h})$)
6月 24日	25.0	5.1
6月 28日 ～ 6月 29日	16.5	1.4
7月 9日 ～ 7月 10日	19.5	1.0
7月 16日 ～ 7月 18日	92.5	28.3
7月 22日 ～ 7月 23日	28.5	3.5
8月 1日 ～ 8月 3日	38.0	5.5
8月 16日	44.0	8.2
8月 18日 ～ 8月 19日	88.5	31.8
8月 27日 ～ 8月 28日	62.5	47.3
8月 31日 ～ 9月 1日	32.5	3.4
10月 12日	46.0	10.3
合計 11 回	493.5	145.8

(b) 2023年 一連降雨 期間（月日～月日）	一連 降雨量 (mm)	$E \cdot I_{30}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{tf}$ / $(\text{ha} \cdot \text{h})$)
5月 21日	13.0	1.6
5月 29日 ～ 5月 30日	13.0	2.7
6月 2日 ～ 6月 3日	33.0	10.7
6月 7日	11.5	5.7
6月 30日 ～ 7月 1日	27.5	6.5
7月 6日	16.0	3.1
7月 12日 ～ 7月 13日	20.0	3.1
7月 15日 ～ 7月 16日	19.0	1.6
7月 17日	13.0	4.9
8月 7日	7.5	2.6
8月 7日 ～ 8月 9日	26.0	5.3
9月 4日 ～ 9月 5日	21.5	4.4
9月 14日 ～ 9月 15日	35.5	14.6
9月 21日 ～ 9月 22日	19.5	1.3
9月 28日 ～ 9月 29日	22.5	3.3
10月 1日	24.0	5.8
10月 10日	38.0	5.6
合計 17 回	360.5	82.8

このように、危険降雨の回数は2023年で多かったが、降水量および降雨エネルギーを評価した降雨係数 R は2022年の方が大きかった。

(2) 傾斜試験枠からの流亡土量評価

USLEにおける調査2か年（期間中）の傾斜試験枠からの流亡土量 A を図-2に示す。

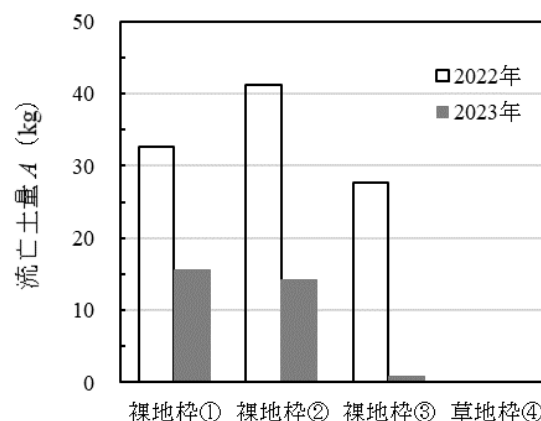


図-2 傾斜試験枠からの流亡土量 A

はじめに、傾斜試験枠のうち、草地枠④では調査2か年ともに流亡土砂は観測されなかった。このように、牧草の繁茂（土壌表面の被覆）による土壌侵食抑制効果が発揮されていた。つぎに、同条件で整地された2022年における裸地3枠①②③からの流亡土量は27.8～41.3kgの範囲にあり、同条件でも流亡土量には一定程度のバラツキがみられた。

つぎに、同条件で整地された裸地枠①②の流亡土量を経年で比較すると、2022年（32.6kg、41.3kg）の方が2023年（15.6kg、14.3kg）よりも2倍以上多く流亡していた。このことは、調査年における降雨係数 R の大きさの違いに起因すると推察される。ここで、整地条件の異なる裸地3枠（①②：軽微な整地のみ、③：耕起作業あり）における2023年の流亡土量を比較すると、耕起作業を繰り返した裸地枠③の流亡土量は0.934kgとなり、整地のみ裸地枠①②（14.3～15.6kg）と比較して15分の1以下に抑制されていた。

以上より、裸地枠における侵食・流亡性が同程度の土壌では、降雨係数 R が流亡土量 A に大きく影響していた。同時に、圃場における耕起作業の有無が土壌の流亡性に影響を及ぼすことも確認できた。このことを考慮した上で、裸地枠における表層土の土壌係数 K を算出・評価していく予定である。

(3) 傾斜試験枠における土壌物理性・流亡性評価

傾斜試験枠（裸地3枠①②③および草地枠④）の中央部において、地表面下0～10cmおよび10～20cmの深さから2023年に採取された不攪乱土を用いた土の飽和透水試験（変水位）の結果を表-2に、土の保水性試験（pF試験：土柱法・遠心法）の結果を図-3(a)～(c)に示す。

表-2 傾斜試験枠・作土層の透水係数 (2023 年)

深さ (cm)	透水係数 (cm/s)			
	裸地枠①	裸地枠②	裸地枠③	草地枠④
0～10	6.7×10^{-6}	1.6×10^{-6}	6.0×10^{-4}	9.4×10^{-4}
10～20	6.8×10^{-6}	2.1×10^{-6}	7.1×10^{-6}	1.1×10^{-6}

このとき、深さ10～20cmにおける不攪乱土の透水係数はいずれも 10^{-6} オーダー ($1.1 \times 10^{-6} \sim 7.1 \times 10^{-6}$ cm/s) となり、傾斜試験枠内の透水性はいずれも劣悪であった。これは、2021年以前に草地利用されていたため、農作業機械によって圃場が経年的に転圧を受けていたことが一因と考えられる。

表層土(深さ0～10cm)では土の透水性に大きな差が認められた。裸地枠①②では土の透水係数が 10^{-6} オーダー ($1.6 \times 10^{-6} \sim 6.7 \times 10^{-6}$ cm/s) であり、軽微な整地のみを実施してきた裸地枠内では表層土の透水性も劣悪であった。一方、裸地枠③で 6.0×10^{-4} cm/s、草地枠④では 9.4×10^{-4} cm/sであり、土の透水性は比較的良好であった。裸地枠③は耕起作業を通じて表層土が膨軟になり、通水性の改善につながったと考えられる。また、草地枠④の表層土付近は牧草の根群域であり、連続的な間隙が多数存在することで通水性が確保できていたと考えられる。

一般に、表層土の透水性が改善すると地下浸透水の増大に伴い地表流去水の減少が期待される。このことが、裸地枠③において地表流去水に伴う土砂の侵食・流去を低減させたと推察される。

また、土の保水性試験(pF試験：土柱法・遠心法)の結果を水分特性曲線で見ると、土の透水係数が 10^{-6} オーダーを示した6つの供試体(cf：図-3(a))では、pF1.0からpF2.0に変化する間で含水比はほとんど減少しておらず、pF2.5までを含めて含水比に大きな差はみられなかった。一方、深さ0～10cmにおける裸地枠③・草地枠④では、pF1.0からpF4.2へと変化していく間で含水比も一定に減少していることが確認できた(図-3(b)(c))。

ここで、2023年に裸地枠①②③から採取した表層土(8月25日採取土、深さ0～5cm)および侵食流亡土(6月7日～7月1日流亡土)の粒度試験結果を示す(表-3)。

傾斜試験枠(裸地枠①②③)では、シルト分が70.5～73.9%、粘土分とあわせた細粒分(0.075mm未満)は77.5～83.5%を占めていた。このとき、裸地枠内における採取土の礫分は①3.8%>②2.9%>③1.5%であったのに対し、流亡土では①1.5%<②3.8%<③5.0%であった。このことは、耕起した裸地枠③で表面流去水が発生した場合、粒径の大きな土砂が流亡する可能性を示唆している。2023年の降雨量・降雨係数 R は小さかったため、2022年のような大きな危険降雨による裸地土壌の耕起～流亡性を評価できるデータの取得が求められる。

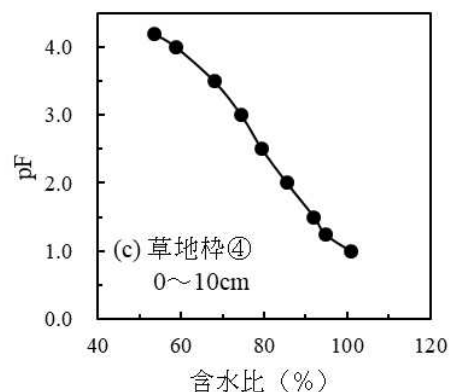
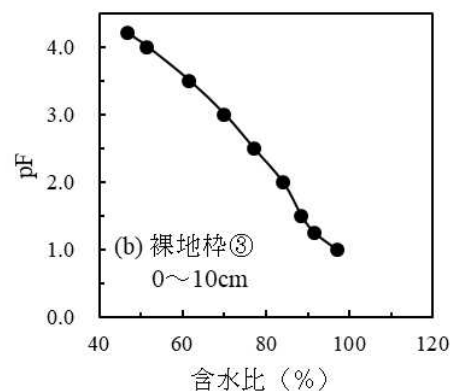
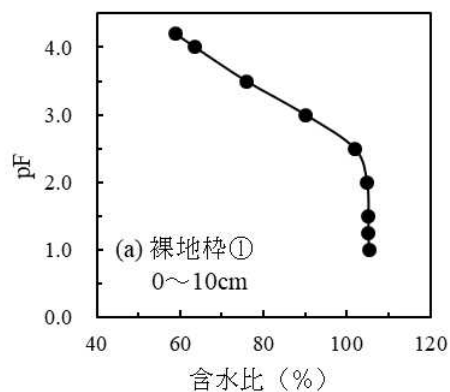


図-3 傾斜試験枠・作土層の水分特性曲線 (2023 年)

表-3 傾斜試験枠の表層土・流亡土の粒度特性(2023 年)

粒径 区分		粒度 (%)		
		裸地枠①	裸地枠②	裸地枠③
採取土	礫	3.8	2.9	1.5
	砂	18.0	19.6	19.0
	シルト	72.4	70.7	73.6
	粘土	5.8	6.8	5.9
流亡土	礫	1.5	3.8	5.0
	砂	19.1	12.7	15.0
	シルト	71.5	73.9	70.5
	粘土	7.9	9.6	9.5

長澤ら⁸⁾は、北海道東部十勝管内浦幌町で実施された国営農地開発事業「稲穂地区」において傾斜畑からの侵食流亡性を評価する中で、秋播コムギ収穫後の耕起作業を通じて土壌の流亡性（沈砂池の浮流土砂濃度）が高まったことを報告している。いずれにせよ、営農としての耕起作業は傾斜地からの土壌流亡性に影響を及ぼすものであり、両者の関係を解明するには今後さらなる調査研究を通じた有用な知見の積み重ねが必要となる。

4. おわりに

北海道東部釧路管内浜中町（酪農地域）における傾斜地からの土壌流亡性に関する基礎的検討を通じていくつかの知見が得られた。なかでも、圃場管理条件が同程度の裸地状態の流亡土量では、降雨係数 R の影響を大きく受けるとともに、圃場における耕起作業の有無が土壌の流亡性に影響を及ぼしていた。

上記の調査2カ年では、斜地における作物（牧草）の有無のみならず、降水量・ $E I$ 値（降雨係数 R ）、耕起作業の有無により流亡土量 A は大きく異なっていた。このため、現時点でのデータをもとに土壌係数 K を算出してみると、裸地状態では $0.0497 \sim 0.0814 \text{ t} \cdot \text{h} / (\text{m}^2 \cdot \text{tf})$ 、耕起条件では $0.0032 \text{ t} \cdot \text{h} / (\text{m}^2 \cdot \text{tf})$ となり、これらの値の妥当性を判断するには、まだ情報不足と言わざるを得ない。

3. (3) で前述したように、2023年の降水量・ $E I$ 値（降雨係数 R ）は2022年よりも小さな値であった。仮に、裸地枠③（耕起条件下）で大きな危険降雨に見舞われ、表層土が飽和した後もさらに降雨が継続する環境下では、粒径の大きな侵食・流亡土が発生する可能性が否めない。耕起による侵食・流亡性挙動の解明に向けて、2024年以降の継続調査を通じたデータの蓄積が期待される。

謝辞：地域整備方向検討調査業務「浜中地域」を推進する上で、帯広畜産大学教授・宗岡寿美博士ならびに寒地土木研究所の各位には調査の方向性に関する示唆を賜り、調査・実験データ取得に格段のご尽力を賜った。以上の関係各位に対して心より感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 沢井亮治：農地開発等に伴う水質汚濁防止工法について—北海道根釧地域における実施例—，農業土木学会誌 44(10)，pp.12～18および口絵写真（1976）。
- 2) 田淵俊雄・吉野邦彦・志村もと子・黒田清一郎・石川雅也・山路永司：農林地からの流出水の硝酸態窒素濃度と土地利用との関係，農業土木学会論文集 178，pp.129～135（1995）。
- 3) 長澤徹明・井上京・梅田安治・宗岡寿美：北海道東部の大規模酪農地域における河川の水質環境，水文・水資源学会誌 8(3)，pp.267～274（1995）。
- 4) 山崎由理・宗岡寿美・木村賢人・辻修：肥灌灌漑施設の新設と河川水中の全窒素濃度の改善効果，農業農村工学会誌 86(8)，pp.33～36（2018）。
- 5) 長澤徹明・梅田安治・大西峰隆：降雨係数の推定に関する雨水と融雪水の影響—北海道における土壌侵食抑制に関する研究(Ⅲ)—，農業土木学会論文集 167，pp.97～102（1993）。
- 6) 長澤徹明・梅田安治・大西峰隆：侵食流亡土量の推定に関する土壌と作物栽培の影響—北海道における土壌侵食抑制に関する研究(Ⅳ)—，農業土木学会論文集 176，pp.169～175（1995）。
- 7) 辻修・松田豊・土谷富士夫：寒冷地における造成農地法面の土壌侵食—十勝地域における農地保全に関する研究(Ⅰ)—，農業土木学会論文集 186，pp.43～51（1996）。
- 8) 長澤徹明・梅田安治・井上京・宗岡寿美：傾斜畑における営農と土壌保全問題，土壌の物理性 71，pp.47～51（1995）。