

USLEによる畑地流域からの土砂流出解析

寒地土木研究所 水利基盤チーム ○鶴木 啓二
多田 大嗣
寒地土木研究所 道北支所 細川 博明

流域からの土砂流出に対する抑制施設を整備するためには、精度良く土砂流出量を予測する必要がある。本研究では、土砂流出抑制施設の容量決定に用いられることの多い汎用土壌流亡予測式（USLE）を用い、現地調査を行わずに入手可能なデータにより畑地流域からの土砂流出量を推定した。その結果、パラメータの設定によって推定値が大きく異なること、面積比率の小さい裸地からの流出土砂量が多い可能性のあることを明らかにした。

キーワード： 土砂流出，農地，USLE，GIS

1. はじめに

北海道では道南や道東を中心として火山灰性土壌が広がり、そこでは畑作農業が広く行われている。これら地域の傾斜畑圃場の一部では、降雨や融雪により表面が侵食されて土壌流亡が生じやすい状況にある。これにより、排水路では土砂が堆積して排水機能が低下し、農地では浸水や過湿により作物生育の障害となっている。また、排水路に流入した土砂は下流の湖沼や湿地等に流出し、土砂に含まれる富栄養化物質とともに水環境を悪化させ、水生生物の生育環境や漁業への影響が問題となっている。国営農業農村整備事業では総合農地防災事業や環境保全型かんがい排水事業など排水路関連事業において、土砂や栄養塩類の下流への流出を抑制するために沈砂池を整備してきた。

国営農業農村整備事業における沈砂池の容量決定には、経験モデルであるUSLE（Universal Soil Loss Equation, 汎用土壌流亡予測式）を用いることが多い。USLEは、後述するように6種類の係数の積から土壌流亡量を算出するものである。しかし、これら係数の決定には長期の現地観測データが必要であり、独自観測で収集することは困難なものが多い。そのため、実際の適用の際には、過去のデータにより整理された数値が用いられる。これら各係数を用いて流域からの土砂流亡量を算出するには、流域の土地利用や地形、土壌、作付作物などの情報を収集する必要があるが、すべてを現地調査から得ることは多大な労力を要し、得られたデータの整理も煩雑となる。しかし、今では既存の資料や市販の地形データ、衛星写真等でこれらを収集することが可能と

なり、GISツールにより一括整理することができる。

本稿では、複数の畑地流域を対象に、現地調査を行わずに入手可能なデータから土地利用や地形等の情報をGISツールを用いて収集・整理し、USLEの各係数の適用方法を検討して、流域からの土砂流出量を算出した。これにより、流域からの土砂流出量の推定にUSLEを適用する際の留意点などを考察したので報告する。

2. 汎用土壌流亡予測式(USLE)の概要

USLEは米国農務省を中心に開発され、同国の農地保全基準として採用されてきた。USLEによる流出土砂量予測の目的は、侵食を引き起こす要因を定量評価し、その地域に適合する保全方法の指針を与えることにある。日本においても土壌保全の検討に対して「土地改良事業計画指針 農地開発(改良山成畑工)」¹⁾ (以下、事業計画指針と記す)のなかで適用方法が解説されている。

USLEは降雨毎の流亡土量を予測するのではなく、長期間の平均的な土壌流亡量を予測するために用いられる。USLEによる土壌流亡量の予測は5つの係数の積で次式のように表される。

$$A = R K L S C P$$

A：単位面積当たり流亡土量 (tf・ha⁻¹)

R：降雨係数 (tf・m³・ha⁻¹・h⁻¹)

一連降雨（無降雨時間 6 時間以内）の降水量が 12.7mm 以上、または 15 分当たりの降雨強度が 6.4mm 以上と定義される侵食性降雨の運動エネ

ルギー E とその降雨の最大 30 分間降雨強度 I_{30} の積 I_{30} の年間合計値である。積雪寒冷地では融雪流出も考慮する。

K : 土壌係数 ($h \cdot m^{-2}$)

単位降雨当たりの流亡土量を与える係数で、その地域の土壌の受食性を示す指標である。

LS : 地形係数 (無次元)

傾斜地における勾配と斜面長の影響を表す係数である。斜面長係数 L と傾斜係数 S として設定されているが、地形係数 LS として適用されることが多い。

C : 作物係数 (無次元)

作物被覆と営農管理の影響を表す係数で、裸地区に対する流亡土量の比である。作物ごとの標準値が整理されている。

P : 保全係数 (無次元)

畝立て方向、等高線栽培など保全的耕作の効果を表す係数で、平畝、上下耕に対する流亡土量の比である。

3. GISによる流域データの作成

USLE による土砂流出量算出の対象は、北海道網走管内の近接する 3 流域 (A, B, C 流域) とした。この地域は、受食性の高い火山灰性土壌の農地が広がり、融雪期や降雨時に侵食を受けて土壌流亡が生じやすい地域である。土砂流出量の推定に使用する流域データを GIS ツールによって作成した。土地利用は、衛星画像 (QuickBird, 2007 年 5 月 21 日撮影, 分解能約 0.7m, トゥルーカラー) から判読し、森林、畑地 (小麦), 畑地 (小麦以外), 草地, 裸地, 荒地・その他, 人工構造物, ビニールハウス, 舗装道路, 未舗装道路, 水域の 11 区分とした (図-1, 表-1)。農地を小麦と小麦以外に区分した理由は、作物係数が大きく異なるためである。また、当該流域の山地では林業が行われており、森林伐採後の山地斜面は表面の被覆状況から裸地と荒地と判定した。さらに、土取場とみられる裸地も複数確認された。なお、衛星画像の撮影日は解析対象期間とは異なるが、対象地域の農地利用状況 (作付面積) に違いの少ないことから、誤差は少ないものと判断した。

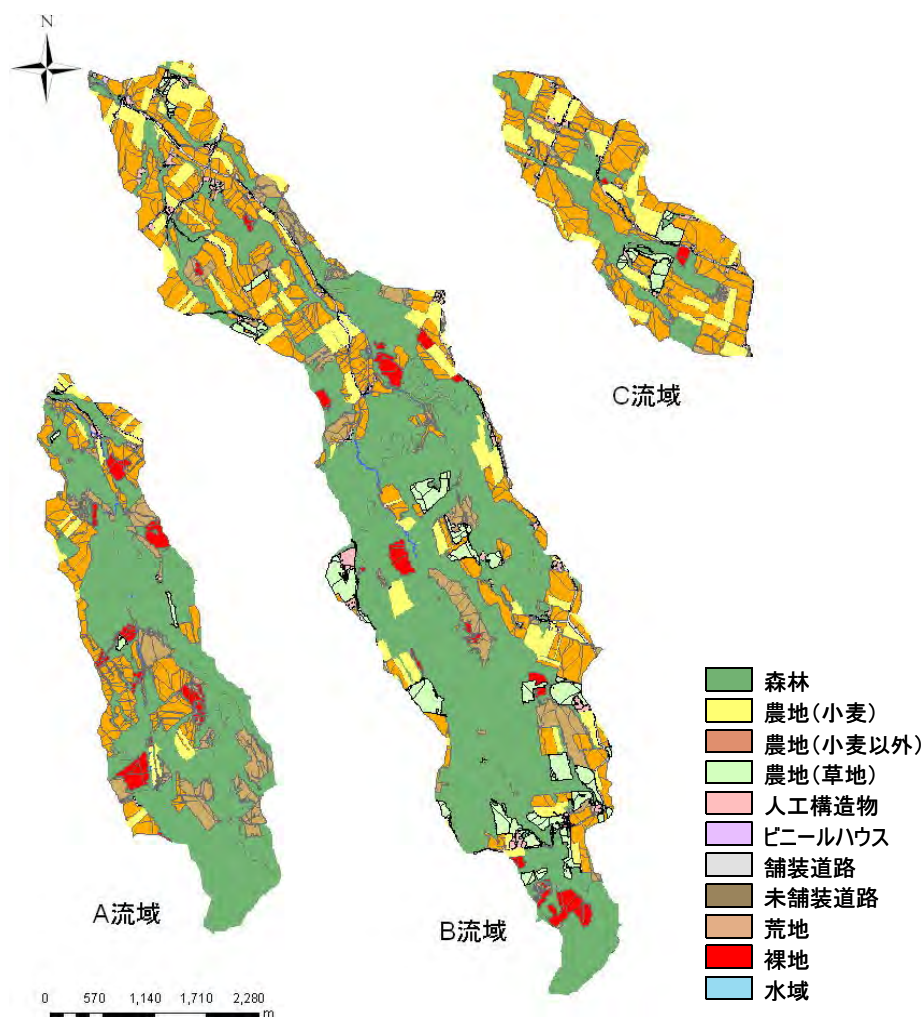


図-1 対象流域の土地利用図

表-1 土地利用面積と割合

単位: ha
カッコ内は全面積に対する割合(%)

	A流域	B流域	C流域
森林	89.3 (23)	890.8 (53)	433.7 (64)
農地(小麦)	64.6 (16)	148.1 (9)	22.2 (3)
農地(小麦以外)	196.7 (50)	364.0 (22)	130.0 (19)
農地(草地)	15.3 (4)	96.2 (6)	3.7 (1)
人工構造物	16.3 (4)	64.0 (4)	6.3 (1)
未舗装道路	0.9 (0)	14.3 (1)	9.4 (1)
荒地	8.5 (2)	96.1 (6)	71.6 (11)
裸地	2.7 (1)	41.7 (2)	31.0 (5)
水域	0.0 (0)	1.9 (0)	0.7 (0)
合計面積	392	1,674	677

人工構造物にビニールハウスと舗装道路を算入

土地利用の境界で分けしたポリゴンは、森林などでは複数の集水域を含む大面積となる場合があり、地形係数を求めることが困難となる。そこで、GIS ツールの機能を用いて標高データから小集水域を決定し、10ha 以内の小区画に分割した。

4. USLEの係数の検討

(1)降雨係数(R)

降雨係数(R)は、夏期の降雨に関する降雨流出係数(Rr)と融雪融凍に関する融雪流出係数(Rs)の和で算出される。

Rrは、降雨侵食指数(EI値)の合計として算出される。本稿では、降雨データの入手・整理の容易な毎正時の降雨量から算出するRr₆₀(=ΣEI₆₀)と、USLEの定義によるEI値に近いとされる10分間雨量によるRr₁₀(=ΣEI₁₀)を求めて比較検討した。ただし、10分間隔の雨量データは入手していないので、60分雨量から換算する手法を用いた²⁾。また、融雪融凍期の耐食性の低下を加味するため、融雪融凍期の降雨係数には、根雪月の降水量(mm)に0.06を乗じた値を降水量に加算して算出した¹⁾。本稿では融雪融凍期を4月と設定した。降水量データは近傍アメダスを用いた。

$$E_{60} = (210 + 89 \log I) \times r$$

$$Rr_{60} = (\sum E_{60} \times I_{60}) \div 100$$

$$E_{10} = -58.74 + 20.88P$$

$$I_{10} = 0.48 + 14.8I_{60}$$

$$Rr_{10} = (\sum E_{10} \times I_{10}) \div 1000$$

I: 区間雨量の降雨強度(cm・h⁻¹)

r: 区間雨量(cm)

E: 一連降雨の降雨エネルギー(m・tf・ha⁻¹)

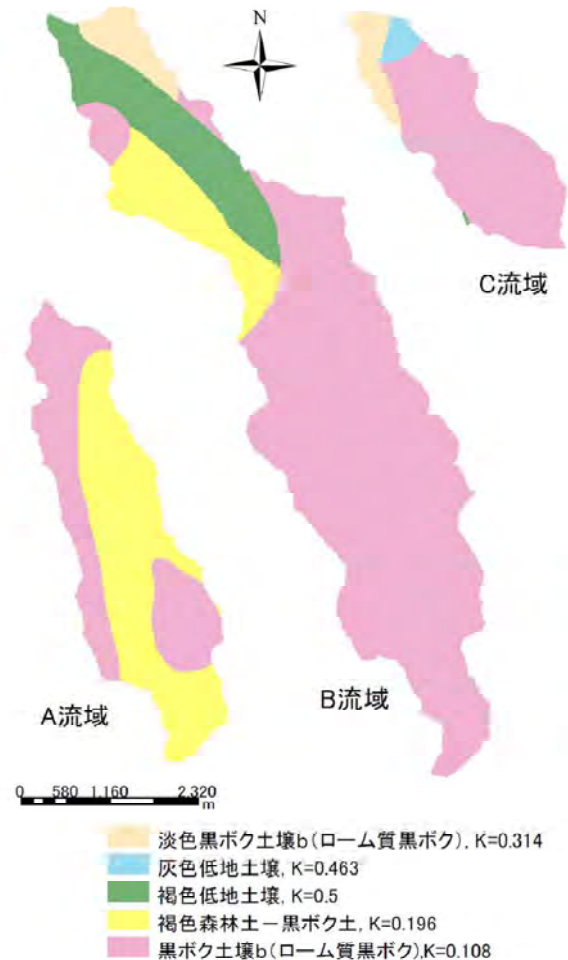


図-2 土壌係数の分布

I₆₀: 最大60分間降雨強度(cm・h⁻¹)

P: 侵食性降雨の総降雨量(mm)

Rsは、USLEの定義から、12～3月の降水量(cm)を1.0倍して求めた。

以上より、Rr₆₀を用いたときはR = 65 (tf・m²・ha⁻¹・h⁻¹)、Rr₁₀を用いたときはR = 105 (tf・m²・ha⁻¹・h⁻¹)と算出された。

(2)土壌係数(K)

土壌係数は、試験圃場の実測値から算出する方法、計算図表により推定する方法、推定式から求める方法が一般的であるが、いずれも現地データが必要であり係数の決定は簡単ではない。そこで本稿では、簡易な係数決定方法として、「国土交通省発行20万分の1土地分類基本調査(土壌図)」³⁾から流域の土壌分類を把握し、これに今井・石渡⁴⁾によって整理されている日本の各種土壌に対する土壌係数を当てはめることにした。分布を図-2に示す。

(3)地形係数(LS)

地形係数は、斜面長係数Lと傾斜係数Sの積で表されるが、流域単位でUSLEを適用する場合、様

々な形状の区画を対象とするため、斜面長の計測が困難となる。そこで、GIS ツールの機能で簡易に地形係数を計算する方法として、斜面長の代わりに計測の簡便な集水面積を用いる方法⁵⁾を採用した。また、同様に GIS ツールによりデジタル標高データ (DEM) から傾斜角を求めて、合わせて地形係数 LS を計算した。計算式は以下のとおりである。分布を図-3に示す。

$$LS = 1.4 \times (As \div 22.13)^{0.4} \times (\sin \beta \div 0.0896)^{1.3}$$

As : 集水域のセル数×セルサイズ

β : セル内の傾斜角

(4)作物係数(C)

USLE の定義では、生育期ごとの C 値と R 値の分布データからその地域に対応する年間の C 値を算出することとなっている。我が国では、全国的に作物の生育期と降雨パターンのそれぞれが類似しているため各種作物の標準値が整理されている。本稿では、事業計画指針で示されている値を採用し、これに記載されていない土地利用区分に関しては、渡辺・永塚⁶⁾が示した値を用いた。農地 (小麦以外) については、詳細な作付データが無いので、当該地域の主要作物であるマメ (大豆, 小豆, エンドウ), バレイショ, タマネギ, ビートの作付比率から平均

値 0.40 を算出して適用した。一覧を表-2に、分布を図-4に示す。

(5)保全係数(P)

当該流域では、水質環境保全のために排水路に対して平行に畝立てすることが行政から農家に指導されているが、すべての圃場で実施されているわけではない。また、畝立て方向や等高線栽培など保全的耕作管理に関する情報を得るには現地調査が必要となる。そこで本稿では、横畝が農地 (小麦, 小麦以外) の半分で実施されていると仮定し、谷山⁷⁾の研究成果である横畝の畑地の P 値の平均値 (0.323)

表-2 作物係数

土地利用区分	作物係数
森林	0.005
農地(小麦)	0.2
農地(小麦以外)	0.4
農地(草地)	0.02
人工構造物	0.01
ビニールハウス	0.01
舗装道路	0.01
未舗装道路	1
荒地・その他	0.05
裸地	1.0
水域	0

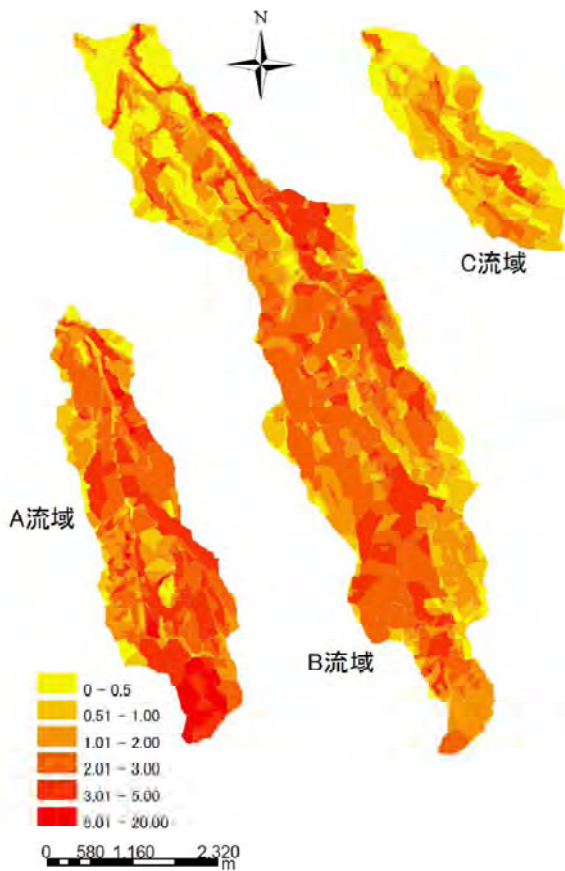


図-3 地形係数の分布

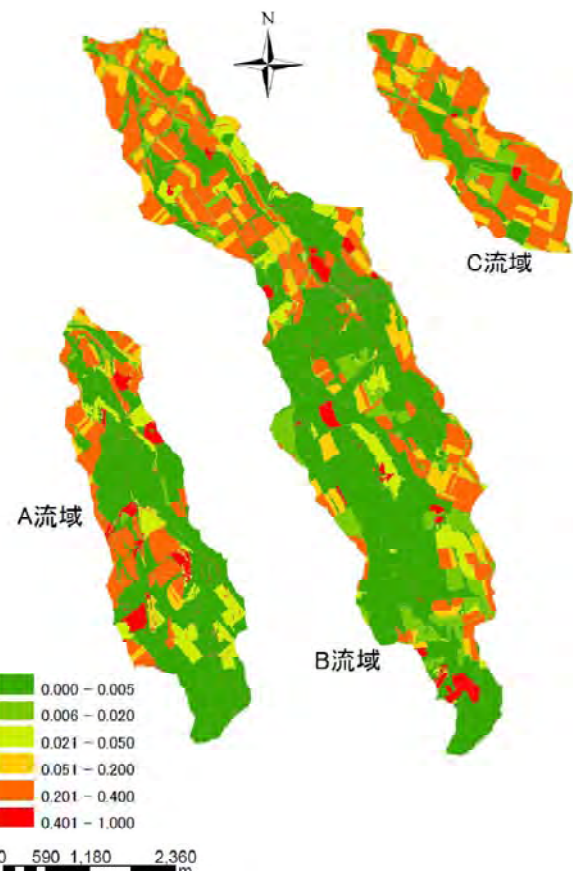


図-4 作物係数の分布

と保全管理をしていない P 値 (1.0) の平均値である 0.66 をすべての農地 (小麦, 小麦以外) に適用した。また, 比較対象として, 保全係数の設定をしない場合 (1.0 を与える) も検討した。なお, 畑地以外は 1.0 (保全的管理をしていない) とした。

5. 土砂流出量の算出結果

(1)係数による土砂流出量の違い

降雨流出係数と保全係数の異なる 4 パターンについて土砂流出量を算出した結果を図-5に示す。降雨流出係数の違いでは 1.6 倍程度の差があった。畑地の保全係数の違いでは, 畑地率の高い A 流域で 1.4 倍程度, 畑地率の低い C 流域で 1.1 倍程度の差が生じた。トータルでは, 降雨流出係数が Rr_{60} で畑地の保全係数を 0.67 とした結果①と降雨流出係数が Rr_{10} で畑地の保全係数を 1.0 とした結果④では 2 倍程度と大きな差となった。

今後の適用にあたって, 降雨流出係数に関しては, 入手の容易な 60 分間雨量から USLE の定義に近い EI_{10} に換算する方法を用いるか, または 10 分間雨量が入手できれば USLE の定義どおりに 30 分間降雨強度による EI_{30} を算出するべきであろう。保全係数に関しては, 対象流域の畑地面積割合が大きい場合は影響が大きいため, 推定精度向上のためには流域の実情を反映させる必要があると考えられる。

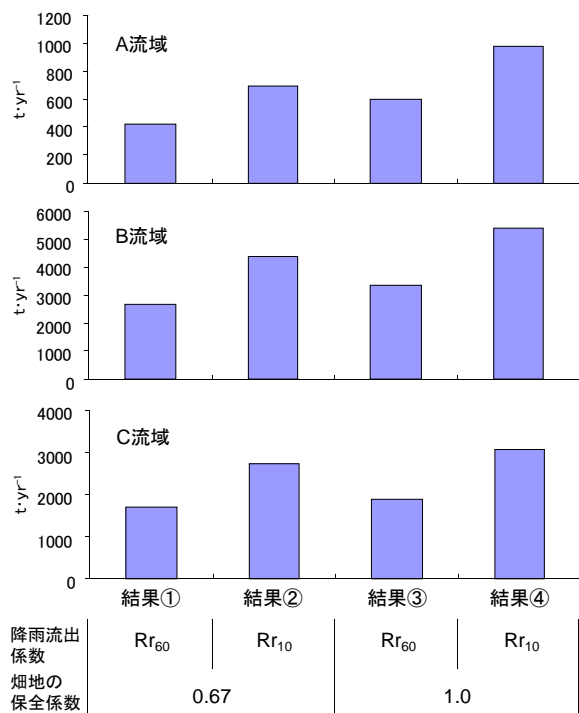


図-5 異なる係数による流出土砂量算出結果

(2)土砂流出ポテンシャル

結果②について, 土砂流出量と単位面積当たり土砂流出量(土砂流出ポテンシャルと称する)を図-6に示す。土砂流出量は流域面積順に B 流域 > C 流域 > A 流域となった。しかし, 土砂流出ポテンシャルは C 流域 > B 流域 > A 流域となり, 近傍流域でも土砂流出状況は大きく異なっていた。土砂流出量に占める各土地利用ごとの割合でみると, C 流域では, 面積割合は 1 割未満の裸地と未舗装道路からの流出が 7 割を占めていた。これが, C 流域で土砂流出ポテンシャルが大きくなる理由である。

最後に, 土地利用区別ごとの土砂流出ポテンシャルを表-3に整理した。裸地および未舗装道路は農地 (小麦, 小麦以外) の 10 ~ 20 倍程度, 森林および草地の 100 ~ 200 倍程度と大きな土砂流出ポテンシャルであった。とくに, 当該流域では裸地が傾斜の急な箇所によく存在していたことから, 地形係数が効いて農地 (小麦, 小麦以外) と比較すると, 作物係数の差以上に大きな差となった。

以上より, USLE によって流域からの土砂流出量

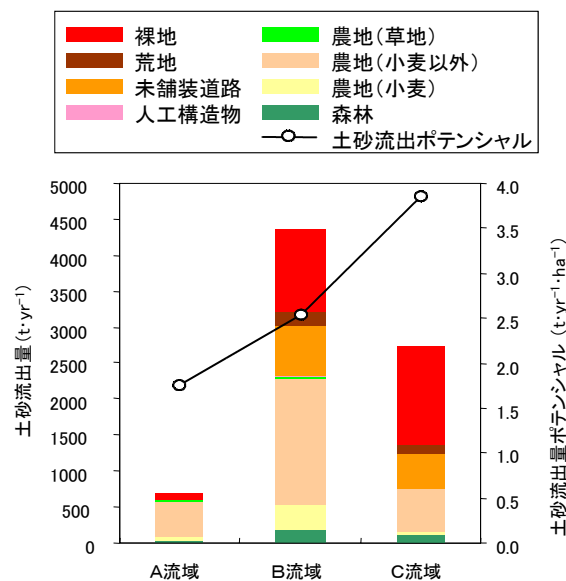


図-6 土砂流出量と土砂流出ポテンシャル (結果②, 人工構造物にビニールハウスと舗装道路を算入)

表-3 土地利用ごとの土砂流出ポテンシャル

	t·yr ⁻¹ ·ha ⁻¹			
	A流域	B流域	C流域	平均値
森林	0.13	0.20	0.28	0.20
農地(小麦)	1.15	2.30	1.74	1.73
農地(小麦以外)	2.51	4.87	4.50	3.96
農地(草地)	0.20	0.27	0.49	0.32
人工構造物	0.09	0.31	0.19	0.19
未舗装道路	16.19	46.94	50.40	37.84
荒地	0.73	2.17	2.18	1.69
裸地	32.18	27.30	43.78	34.42

人工構造物にビニールハウスと舗装道路を算入

を推定するにあたって、小面積であっても裸地や未舗装道路からの土砂流出に対する適正な評価が重要であることが示唆された。

6. まとめ

本稿では、沈砂池の容量決定に用いられることの多い USLE を用い、現地調査を行わずに入手可能なデータにより畑地流域からの土砂流出量を推定した。その結果、パラメータの設定によって推定値が大きく異なること、面積比率の小さい裸地からの流出土砂量が多い可能性のあることを明らかにした。

USLE は対象圃場からの土壌流亡量を求めるものであり、圃場から流亡後の排水路での堆積過程を考慮しておらず、流域末端への実際の到達量よりも過大に推定する可能性がある。そのため、USLE による算出結果を沈砂池の容量決定の資料とするためには、流達率を考慮する必要がある。今後、沈砂池を整備した事業で収集された流出土砂量の関するデータを用いて、流達率の検討を行う予定である。

引用文献

- 1) 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）
- 2) 長澤徹明：積雪寒冷地の小流域保全に関する農業土木的研究（平成3年度文部科学省研究費補助金（一般研究C）研究成果）（1992）
- 3) 国土交通省：20万分の1土地分類基本調査（土壌図）
- 4) 今井啓・石渡輝夫：統計資料等を用いて整理した北海道における土壌浸食因子の地域性について、寒地土木研究所月報 No.640（2006）
- 5) Christos G. K., Tijana S. and Georgios N. S. : Quantification and site-specification of the support practice factor when mapping soil erosion risk associated with olive plantations in the Mediterranean island of Crete, Environ Monit Assess, 149, pp.19-28（2009）
- 6) 渡辺康志・永塚鎮男：GIS利用による陸域影響に関する調査研究，財団法人沖縄化学技術振興センター平成13年度内閣府委託事業（サンゴ）調査研究の結果
- 7) 谷山一郎：農林水産業及び農林水産物貿易と資源・環境に関する総合研究，農林水産技術会議事務局，p.151（2003）