

## 降雨エネルギーを組み込んだ WEPP による侵食量推定手法の評価 Evaluation of WEPP-based Soil Erosion Estimation Method Considering Rainfall Energy

○近藤航樹\* 松井宏之\*\* 大澤和敏\*\*

○Kazuki KONDO\* Hiroyuki MATSUI\*\* Kazutoshi OSAWA\*\*

### 1. 背景および目的

土壌侵食は畑地への降雨によって発生し、農地の生産性を低下させる現象である。また、流出した土砂が周囲の河川や海洋に流れ込むことで、サンゴ礁などの生態系に悪影響を及ぼし、観光業などへの被害も報告されている。WEPP (Water Erosion Prediction Project) は土壌侵食を物理的に解析可能なモデルであり、降雨強度を指標として侵食量を算出する。しかし、筆者らの先行研究(近藤ら, 2024)では、雨滴による侵食(インターリル侵食)において、降雨強度だけでなく降雨エネルギーの考慮が重要である可能性を指摘している。実際に、広く利用される土壌侵食解析モデルである USLE では、侵食性を示す降雨係数に降雨エネルギーが考慮されている。また、坂西ら(1999)は石垣島およびつくばにおいて降雨エネルギーを観測し、地域差を報告している。これによって WEPP の解析結果が実際の土壌侵食量を十分に表現できない可能性がある。そこで、本研究では WEPP の適用性向上を目的として、降雨エネルギーを考慮した土壌侵食量の推定手法を提案し、その有効性を実測値との比較によって評価した。

### 2. 方法

【室内侵食試験】土壌槽に充填した島尻マージに対して、降雨シミュレータ(レインカーテン、テクノコア)に搭載された2種類のノズル(標準・豪雨)によって降雨を与え、インターリル侵食量  $D_i$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、降雨強度  $I$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、流出高  $\sigma$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) を測定した。さらに、降雨シミュレータで生成された雨滴については、ディストロメータ (LPM (Laser Precipitation Monitor), THIES) を用いて落下速度・粒径および個数を測定し、降雨エネルギー  $k_e$  ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) を算出した。侵食試験の結果は式(1)および式(2)により整理し、インターリル受食係数  $K_{ib}$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}$ ) を定量化し、降雨エネルギーに対する受食性パラメータ  $K_{i,\text{energy}}$  ( $\text{kg} \cdot \text{mm} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{J}^{-1}$ ) を定義した。

$$D_i = K_{ib} \cdot I \cdot \sigma \cdot S \quad (1) \quad D_i = K_{i,\text{energy}} \cdot k_e \cdot I \cdot \sigma \cdot S \quad (2)$$

ただし、 $S$  は土壌槽の傾斜に対する補正係数(無次元)である。

【現地観測】2023年9月1日から9月30日にかけて、沖縄県石垣市のサトウキビ圃場(幅2.8m, 長さ90m, 勾配3.6%)において土壌流出の観測を実施した。観測項目は降水量、圃場末端における土砂を含んだ流出水の流出量、およびその濁度である。降雨イベントはUSLEの定義に基づいて抽出し、全5イベントについて単位面積当たりの土壌流出量を算出した(Table 1)。

【WEPPによる解析】現地観測を行った圃場の諸条件をWEPPで再現し、土壌侵食のシミュレーションを行った。営農条件と地形条件は、現地観測値に基づいて設定した。気象条件は、雨量計による観測値を基に、降雨イベントごとのデータを作成した。土壌条件のうち、降雨エネルギーを考慮したインターリル受食係数は、式(2)から得られる  $K_{i,\text{energy}}$  ( $\text{kg} \cdot \text{mm} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{J}^{-1}$ ) に基づいて換算した。この換算には、坂西ら(1999)の報告を参考にし、既存の降雨エネルギーと降雨強度  $I$  ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) の関係式(三原(1951)の式および Wischmeier and Smith (1958)の式)を用いた。

$$K_{ib,\text{Mihara}} = K_{i,\text{energy}} \cdot 8.40I \quad (3) \quad K_{ib,\text{Wischmeier}} = K_{i,\text{energy}} \cdot (11.9 + 8.73 \log I) \quad (4)$$

その他の土壌条件については、室内試験や圃場試験による試験値や文献値を用いた。

\* 東京農工大学大学院連合農学研究科 (United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology)

\*\* 宇都宮大学農学部 (School of Agriculture, Utsunomiya University)

キーワード: 農地保全, 土壌侵食, 降雨エネルギー, WEPP

3. 結果および考察

【室内侵食試験】インターリル侵食試験の結果について、降雨エネルギーを考慮して(式(2))を用いて整理したものを Fig. 1 に示した。従来の手法(式(1))による整理)では降雨エネルギーの違いに起因して回帰直線の傾き  $K_{ib}$  が異なった(図省略)。一方、降雨エネルギーを考慮することによって侵食量を1つの回帰直線によって説明でき、回帰直線の傾き  $K_{i,energy}$  は  $112960 \text{ kg}\cdot\text{mm}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{J}^{-1}$  となった。筆者ら(近藤ら, 2024)は、黒ボク土を対象に降雨エネルギーを用いることでインターリル侵食量を一意に回帰できることを示したが、本研究においても、異なる土壌で同様の傾向が確認されたことから、これは土壌に依存しない普遍的な性質であると考えられる。

【現地観測値と解析値の比較】全5イベントの土壌流出量の観測値と WEPP による解析値の比較を Fig. 2 に示した。なお、リル受食係数  $K_{rb}$  および限界掃流力  $\tau_{cb}$  には圃場試験値を、インターリル受食係数  $K_{ib}$  には以下の値を用いた。①標準ノズルおよび豪雨ノズルによる室内試験値(順に  $K_{ib,Standard}$ ,  $K_{ib,Heavy}$ )、②観測された最大30分間降雨強度と侵食試験による  $K_{i,energy}$  を式(3)ならびに式(4)に代入して得られる換算値(順に  $K_{ib,Mihara}$ ,  $K_{ib,Wischmeier}$ )、③WEPP に組み込まれている推定式によって得られる推定値( $K_{ib,Estimated}$ )である(③の場合のみ  $K_{rb}$  と  $\tau_{cb}$  も推定値)。さらに、それぞれの  $K_{ib}$  に対する推定精度を検証するため、RMSE(二乗平均平方根誤差, 0に近いほど高精度)およびNSE(Nash-Sutcliffe 効率係数, 1に近いほど高精度)を算出し、Table 2 に示した。

自然降雨のエネルギーを考慮していない  $K_{ib,Standard}$  や  $K_{ib,Heavy}$  を入力値とした場合、降雨シミュレータの降雨エネルギーが小さいことに起因して、土壌流出量は過小評価となった。一方、WEPP に組み込まれた推定値( $K_{ib,Estimated}$ )を用いた場合には、土壌流出量は過大評価となった。これに対し、自然降雨の降雨エネルギーを反映した  $K_{ib,Mihara}$  や特に  $K_{ib,Wischmeier}$  を用いた場合は、観測値との差が小さくなり、RMSE も低く、また NSE も 1 に近くなり、高い再現性が確認された。この結果から、自然降雨のエネルギーを反映する手法は、WEPP による侵食解析の精度向上に寄与する可能性が示唆された。

4. 結論および今後の課題

WEPP に降雨エネルギーを導入することによって、土壌流出量の推定精度が向上した。今後は、層状性降雨および対流性降雨(線状降水帯を含む)などの降雨形態の違いや、降雨イベントごとの降雨エネルギーの変動を考慮したモデル化手法の開発が求められる。

引用文献

坂西ら(1999): Disdrometer を用いた雨滴粒径分布と運動エネルギーの測定, 農業土木学会論文集, 67(6), 119-125.  
近藤ら(2024): 降雨エネルギーに基づく WEPP のインターリル侵食過程の評価, 第73回農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 131-132.  
三原義秋(1951): 雨滴と土壌侵蝕, 農業技術研究所報告 A: 物理統計, 1, 1-59.  
Yamaji et al.(2020): 4-year Climatology of Global Drop Size Distribution and its Seasonal Variability Observed by Spaceborne Dual-frequency Precipitation Radar, Journal of the Meteorological Society of Japan, 98(4), 755-773.  
Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1958): Rainfall Energy and its Relationship to Soil Loss, Transactions, American Geophysical Union, 39, 285-291.

Table 1 現地観測値の一覧

| List of field observations |            |                                      |                   |                                |           |
|----------------------------|------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------|
| Event                      | 総降水量<br>mm | 最大30分間<br>降雨強度<br>mm·h <sup>-1</sup> | 降雨<br>継続時間<br>min | 土壌<br>流出量<br>g·m <sup>-2</sup> | 流出高<br>mm |
| Sep 5                      | 22         | 41                                   | 54                | 301                            | 16.0      |
| Sep 8                      | 27         | 36                                   | 96                | 337                            | 22.6      |
| Sep 18                     | 15         | 30                                   | 30                | 169                            | 9.2       |
| Sep 21                     | 20.5       | 40                                   | 83                | 190                            | 17.7      |
| Sep 29                     | 10.5       | 19                                   | 52                | 69                             | 6.7       |

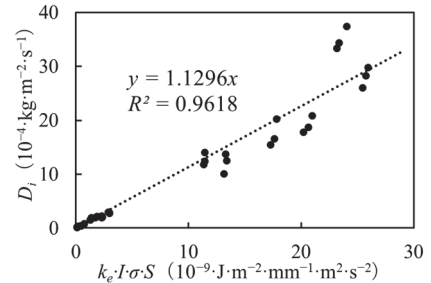


Fig. 1 降雨エネルギーを考慮した場合のインターリル試験結果  
Results of the interrill erosion test considering rainfall energy

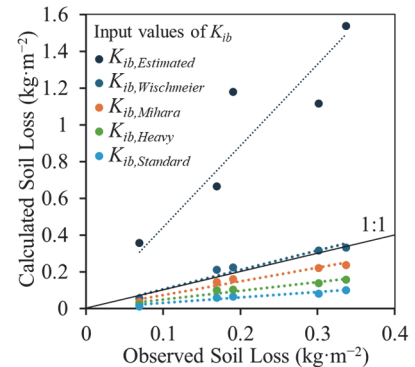


Fig. 2 土壌流出量の実測値と観測値の比較  
Comparison of measured and analyzed soil losses

Table 2 入力した  $K_{ib}$  ごとの推定精度  
Estimation accuracy for each input values of  $K_{ib}$

|                            | $K_{ib,Standard}$ | $K_{ib,Heavy}$ | $K_{ib,Mihara}$ | $K_{ib,Wischmeier}$ | $K_{ib,Estimated}$ |
|----------------------------|-------------------|----------------|-----------------|---------------------|--------------------|
| RMSE (kg·m <sup>-2</sup> ) | 0.16              | 0.12           | 0.06            | 0.03                | 0.83               |
| NSE                        | -0.16             | -0.06          | 0.52            | 0.94                | 0.08               |