

気候変動下で水食を評価する Evaluation of water erosion under climate change

○西村拓

○Taku Nishimura

1. 土壌保全と侵食モデルの必要性

土壌は、農地における生産基盤としてだけではなく、多くの生態系サービスを提供している。FAOのSoil Functionsのサイトでは、食料生産以外に炭素固定、洪水緩和、遺伝資源等で11の土壌の生態系サービスが示されている。侵食に伴って土壌中の有機炭素が分解されやすくなり、温室効果ガス発生が促進される可能性も指摘されている(Lal, 2019)。一方で、農地、特に畑地における土壌侵食は、農地劣化の主因の一つであり、1930年代には、米国のBennettの提唱等によって侵食研究に注力され始めたが、その後90年たった今でも世界中で深刻な課題であり続けている。

土地利用型農業である穀物生産では、今日でもしばしば1kgの穀物生産に伴って1kg以上の農耕地土壌が失われていると指摘されている(Nearing et al. 2017a)。FAO statのデータでは、1960年以降、世界中で農地開発をしているにもかかわらず、収穫農地面積はほぼ横ばいで、作っては壊す自転車操業状態が続いており、これ以上の農地荒廃は避けるべきと考えられる。

近年、温暖化に伴う大気中の水蒸気密度の増大によって短時間高強度の降雨の頻度が増えつつある。降雨による侵食(水食)は、降雨強度が土壌の飽和透水係数を超え、土壌に浸入できない過剰降雨が地表面流出となって流れると加速するため、気候変動下の降雨強度の増大と水食の関連を検討することは喫緊の課題である。農耕地における水食は、自然な土地利用の10から100倍の量とはいえ、質量にして $11 \text{ t ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ 程度の深刻な土壌流亡であっても土層厚さの変化に換算するとわずか 数 mm y^{-1} である。通常の圃場で流亡した土と元々の土を識別することは困難であるため、水食の程度や土壌保全対策の効果を評価するためには、流亡土量を定量化するモデルを活用する必要がある。

2. Universal Soil Loss Equation (USLE)

代表的な水食モデルとしてUSLE(Wischmeier and Smith 1978)がある。USLEは、上で触れた1930年代から継続的に実施されてきた水食枠試験の結果を統計処理して作った経験モデルである。改良版(RUSLE(Renard et al. 1997), RUSLE2(USDA-ARS 2013))を含めて、世界中で広く使われている。ただし、RUSLEは、降雨パラメータの算出が不適切で侵食量の過小評価が生じるため、現在はRUSLE2の使用が推奨されている(Nearing et al. 2017b)。

一連のUSLE系モデルは、様々な改良が施され、農地圃場から発生する年単位の水食量を評価するという元々のモデルから、GISと組み合わせて農耕地圃場群を起源とする水食量を扱うことも可能になっている。しかし、近年顕在化している「短時間高強度降雨の頻度増大と、それにもかかわらず、年間降水量は不変」(気象庁, 2019)という傾向は、基本構造として年侵食量を議論するUSLEでは今後生じる水食の予測・評価には対応しきれないことを示唆している。

後年の改良に伴ってRUSLE2では、降雨毎の侵食への対応も試みられており、降雨毎の地表面流出量を入力データとして入れられる場合には、降雨イベント毎の侵食量を出力することも可能であ

る (Kinnell, 2010). また、水文学分野では、広域水文モデルの地表流部分と USLE を組み合わせて、広域の侵食を評価する試みも行われている。ただし、USLE による侵食量は、圃場から外へ出ることしかわからず、USLE だけでは圃場内外の凹部に堆積する土砂についても議論できないため、保全対策の評価には不適切になりつつある。

3. プロセスモデルの必要性と課題

USLE のような統計モデルではなく、降雨の流出と土粒子の剥離・輸送・堆積をそれぞれ数式で表現したプロセスモデルの開発が 1990 年代から行われてきた。デファクトスタンダードとなっている USLE 系モデルの代替となるためには、同程度の侵食量予測能力が求められるが、プロセスモデルの本質的な特徴は、降雨毎の侵食を評価できること、圃場内外で生じる土砂流亡・堆積の時空間変動を表現できることに加えて、モデルパラメータの時空間変動も考慮できる部分にある。さらに、USLE 系モデルでは、統計解析の結果として、降雨エネルギーを侵食量を説明する主要な変数の一つとして採用したが、リル・ガリ等に代表される大きな水食では、土壌は地表面流去水の水理学的作用で切削・運搬されるため、降雨エネルギーよりも流出水量や流出水の水深・流速に関わる降雨強度が重要になる。これらを考慮すると、今後の気候変動に伴う降雨特性の変化を考慮した水食の予測対策には、プロセスモデルが適当と考えられる。

こういったプロセスモデルの代表的なものとして米国農務省で開発した WEPP、英国の Cranfield 大学で作られた EUROSEM 等がある。どのプロセスモデルであっても、設定必要なパラメータの数が非常に多く、それぞれのパラメータの信頼性・不確実性が課題となる (Brazier et al. 2000)。室内実験や圃場実験で必要なパラメータの全てを得ることは現実的ではないため、比較的容易に入手できる土壌、気象、地形等のパラメータについては、それらを使い。さらに、実測した降雨流出、土壌流亡のデータを用いてモデルパラメータをチューニングするような作業が必要になる。

4. 気候変動下の日本における課題

日本の農業は、農地の汎用化、大規模化を目指して変化している。営農効率としては必然的かもしれないが、農耕地における水食の見地から見るとリスクが増す。水田であった農地を畑地利用されることは、言うまでもなく水食のリスクにさらすことになる。耕地の大規模化で営農が粗放的になれば、労働集約的な細やかな保全対策は困難になる。さらに、農村地域の人口が減少すれば、選択と集中で、保全すべき地点を合理的に選ぶ必要が生じる。年間降雨日数が 100 を超え、年降水量が 1500 mm を超える (1920–2019, 東京) 日本では、降雨過剰による地表面流出に起因する侵食増大も今後の気候変動の中でリスクとなる。以上を考慮すると、仮に導入についてのコストが小さくないとしても、USLE ではなく、プロセスモデルを水食の議論に導入する必要がある。導入においては、上で触れたパラメータの整備に加えて、モデルを使うユーザーの教育も課題となる。

参考文献

Brazier et al. (2000) *Earth Surf. Process and Landforms*, 25, 825-845 (2000), Kinnell (2010) *J. of Hydrol.*, 385:384-397, 気象庁 (2019) 気候変動監視レポート 2018, Lal (2019) *Soil & Tillage Research*, 188:35-40, Nearing et al. (2017a) *Int. Soil and Water Conserv. Research*, 5: 77-84, Nearing et al. (2017b) *Catena* 157:357-362, Renard et al. (1997) *USDA Agriculture Handbook*. 703 D.C, Washington (1997) 404 pp., USDA-ARS (2013) https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/RUSLE/RUSLE2_Science_Doc.pdf, Wischmeier and Smith (1978) *Agricultural Handbook No. 537*. US Dept Agric., Washington, DC.

謝辞 本研究は、科研費 (19H00958) の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。