

北海道における降雨流出係数の長期的変化 の地域性

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 水利基盤チーム ○鶴木 啓二
田中 健二

北海道内の主要な気象庁観測点22か所を対象に、土砂流出モデルUSLEの降雨流出係数を長期間算出し、過去から現在に渡る降雨に関する受食性の変化を評価した。その結果、近年、十勝地域と道南地域以外では平均値の大幅な増加である正のジャンプが検出された。また、正のジャンプがあった地点のうち、オホーツク沿岸地域と釧路では増加トレンドも確認されるなど、北海道内における降雨流出係数の変化には地域性がみられた。

キーワード：USLE、土壌侵食、降雨係数

1. はじめに

近年、地球温暖化が進行することで気候システムが変化し、陸域での大雨や短時間強雨の回数増加が予測されている。北海道においても気候変動により雨の降り方が変化していると指摘されており¹⁾、1時間降水量30mm以上という短時間強雨の発生頻度が30年前と比較して約1.6倍という報告もある²⁾。降水量の増加や降雨強度の上昇は土壌侵食を増加させるため、今後、傾斜農地からの土壌流亡が現在よりも顕著化する可能性がある。農地からの土壌流亡は、農地の生産性低下や排水路への土砂堆積といった農業活動への影響のほか、水環境への影響も懸念される。

農地からの土壌流亡への対策として、営農での対策と土木的な対策がある。農業農村整備事業で取り得る土木的な対策としては、農地の傾斜改良、承水路など排水網の整備、沈砂池の設置、緩衝帯の設置などが考えられるが、降雨状況が変化しているのであれば、規模や構造を再検討する必要がある、そのためには土壌流亡への降雨の影響変化を適切に評価しなければならない。

本研究では、北海道内における主要な気象庁の気象観測点を対象に、降雨状況に関係する土壌の受食性の変化を把握することを目的として、USLEの降雨流出係数を長期間算出し、長期トレンドと平均値の変化を整理した。

2. 検討方法

(1) USLE概要

農業農村整備事業の計画設計では、土壌流亡量の予測

手法として土砂流出モデルであるUSLEが利用されている。USLEは米国農務省を中心に開発された土壌流亡量予測ための経験モデルであり、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を目的として適用される。USLEによる土壌流亡量の予測は、6つの係数の積で次式のように定義されている³⁾。

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

ここに、 A ：単位面積当たり流亡土量 ($\text{tf} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$)、 R ：降雨係数 ($\text{tf} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$)、 K ：土壌係数 ($\text{h} \cdot \text{m}^2$)、 L ：斜面長係数（無次元）、 S ：傾斜係数（無次元）、 C ：作物係数（無次元）、 P ：保全係数（無次元）である。

(2) 降雨流出係数算出方法

土壌侵食（水食）は降雨と融雪により引き起こされる。式(1)の降雨係数も降雨流出係数 (R_r) と融雪流出係数の年間値の和として算出される。本研究では、これらのうち、降雨流出係数を検討の対象とした。

降雨流出係数は、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} ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$) の積である降雨侵食指数 EI_{30} ($\text{tf} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) の年間（4～11月）合計値である。侵食性降雨は、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分当たりの降水量が6.35mm以上の降雨と定義されている。算出式に最大降雨強度を用いるので、短時間強雨が増加している地域であれば、降雨流出係数は以前よりも増加していると考えられる。

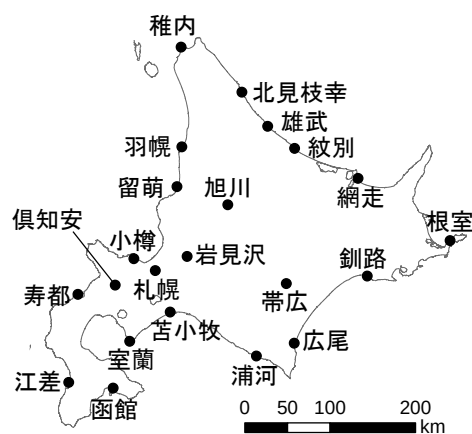
10分値データの場合、USLEの定義通り最大30分降雨強度 (I_{30}) を用いて EI_{30} を算出できる。しかし、10分値の観測は1994年からであり、データが少ない。そこで、比較的長期の傾向を観察するため、1時間値データによ

ここに、 E_s ($\text{m} \cdot \text{tf} \cdot \text{ha}^{-1}$) : 区間降雨エネルギー、 I : 区間雨量の降雨強度 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)、 r (cm) : 区間雨量である。区間とは、1時間値データでは1時間となるので、1時間値データを用いる場合、(2)式の I と r は等しくなる。なお、 R_{r60} はUSLEの定義通り求めた降雨流出係数(R_{r10})よりも過小に算出されるので、10分値データの無い期間に R_{r60} を用いて土壌流出量を算出するには、 R_{r10} 相当の値に換算するための R_{r10}/R_{r60} 比を乗じなければならぬ⁴⁾。

(3) 使用データ

降雨流出係数の算出対象とした気象庁の観測点は、北海道内にある札幌管区気象台、地方気象台（稚内など6箇所）、帯広測候所、特別地域気象観測所（岩見沢など14箇所）である（図-1）。各観測点の降雨観測状況を表-1に示す。通年の降雨量観測が始まったのは函館が最も早く、1873年から年降水量（月ごと）のデータが揃っている。年降水量は、函館以外にも1800年代後半から1900年代前半に観測を始めた地点が多数ある。一方、降雨流出係数が算出可能な4月から11月の1時間値を長期観測しているのは、1880年代後半から継続している札幌のみであった。札幌以外は、継続して観測を実施しているのは1960年代以降であった。

以上より、降雨流出係数の算出に利用した1時間降水量データは、札幌のみ1889年から2021年、その他地点は1962年（地点によっては、1963年か1964年）から2021年までとした。降水量データは気象庁のWebサイトから入手した。



図一1 気象観測地点位置図

表一1 観測地点の降水量観測状況

地点名	降水量観測期間	
	通年(月値)	4月～11月の1時間値
稚内	1938-	1940-1949、1962-
北見枝幸	1943-	1964-
旭川	1889-	1962-
羽幌	1921-	1964-
留萌	1943-	1962-
札幌	1877-	1889-
岩見沢	1947-	1963-
小樽	1943-	1964-
倶知安	1944-	1962-
寿都	1885-	1964-
雄武	1943-	1964-
紋別	1956-	1964-
網走	1890-	1964-
根室	1880-	1889-1923、1962-
釧路	1890-	1963-
帯広	1892-	1964-
広尾	1958-	1964-
苫小牧	1943-	1964-
室蘭	1923-	1963-
浦河	1927-	1962-
函館	1873-	1897-1934、1961-
江差	1941-	1963-

減がみられ、2010年以降は高い値が連続した。一方、降雨流出係数は1900年頃が最も低く、その後1950年頃まで平均より低い傾向で推移し、1970年代以降は平均より高い年が多く、とくに2010年以降に高い値が連続した。

線形トレンドは、どちらも経年的に増加する傾向がみられるものの、有意性（以下、すべての検定で有意確率 $p<0.05$ とした）についてt検定を行ったところ、夏季降水量は有意性無し、降雨流出係数は有意性有りと判定された。夏季降水量には、水文や水質時系列データのトレンド検定で用いられることの多いMann-Kendall検定でも有意な傾向は確認できなかった。

夏季降水量は、増減幅が大きいため有意な傾向無しに判定されたと考えられるが、1950年頃以降は、上昇傾向にみえる。そこで、1951年以降のデータについて線形トレンドを確認すると、相関式は「 $y = 1.724x - 2702$ 」とな

3. 結果と考察

(1) 札幌地点における降雨流出係数の変化

a) 長期変動状況とトレンド

ここでは、観測地点のなかで長期間の降雨流出係数が算出可能な札幌について変動状況を検討した。最初に、4月～11月降水量（以下、夏季降水量と記す）と降雨流出係数について、年間値の経時変化、全データの平均値と線形トレンド（回帰直線）、前後5年の10年移動平均値を図-2に示す。全体の変動状況として、夏季降水量は1900年頃に少なく、1930年頃に増加、1950年頃に減少するなど、観測期間中に平均値を挟んで比較的大きな増

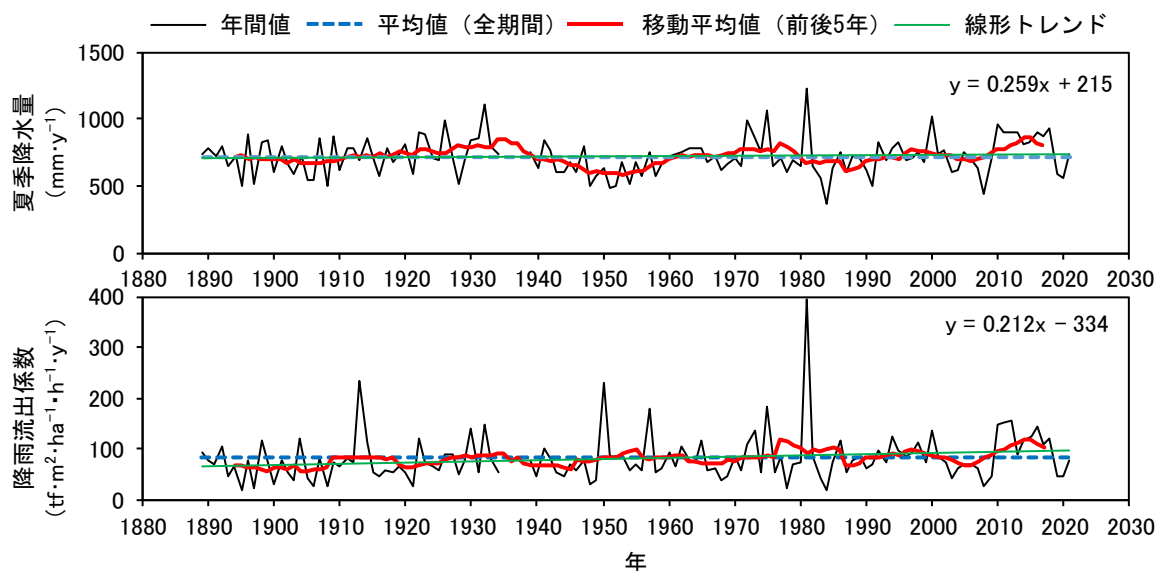


図-2 札幌の夏季降水量と降雨流出係数の変動状況
(数式は直線回帰式)

り、図-2に示した全期間のトレンドと比較して年上昇率が大きく、相関性についても有意な関係が認められた。すなわち、近年70年については、夏季降水量も有意に増加していることになる。

b) 平均値のジャンプ

前項にて、札幌の夏季降水量と降雨流出係数が近年増加傾向にあることを確認した。増加が漸増であれば、気象庁が採用する30年平均値のように、一定期間の平均値を地点の代表値とすれば良い。しかし、近年の気候変動により平均値が短期間で大幅に変化しているのであれば、USLEによる土壌流失量予測には、変化後の係数を適用しなければならない。そこで、夏季降水量と降雨流出係数の平均値に短期間で大きな変化が生じていないかジャンプ検定を行った。ここで、ジャンプ（いわゆる気候ジャンプ）とは、雨や気温といった気候要素が数十年間隔で急激に変化することである⁹⁾。本稿では、ある年の前後10年以上のデータの平均値について、統計的な有意差の有無を検定した（*ある年”は後半に入れた）。

平均値の差の検定に先んじて、まず全データ（ $n=133$ ）を前半期間（ ≥ 10 年）と後半期間（ ≥ 10 年）のデータ $[X_i, Y_j]$ （ $i+j=n$ 、 $i=10, 11 \cdots 122, 123$ ）に分けた。つぎに、データ $[X_i, Y_j]$ について、Shapiro-Wilk検定にてデータの正規性を調べ、さらに、正規性の認められたデータについては、F検定にて分散の同一性を検定した。以上により、データ $[X_i, Y_j]$ の平均値の差の検定方法として、 X_i と Y_j の両方に正規性がないデータには「Wilcoxonの順位和検定」、両方とも正規性がある分散も等しいデータには「Studentのt検定」、両方とも正規性がある分散は等しくないデータには「Welchのt検定」を用いた。

平均値の差の検定手順として、最初に全データ $[X_i, Y_j]$ に対して、平均値の差の有意性を検定し、有意差が

最も大きい（すなわち、有意確率 p 値が0.05未満で最も小さい）時点を1箇所目のジャンプとした。さらに、その時点における X_i のデータ期間と Y_j のデータ期間が20年以上の場合、それぞれの期間のデータについてジャンプが無いか同様に検定した。複数のジャンプがある場合は、これを繰り返すこととした。

札幌の夏季降水量と降雨流出係数のジャンプ検定の結果を図-3に示す。夏季降水量には3回のジャンプが、降雨流出係数には1回のジャンプが検出された。夏季降水量は観測開始から1930年代まで平均値付近で推移し、1940年代に負のジャンプ、1960年頃に再び平均値付近に戻る正のジャンプ、2010年頃に平均値を上回る正のジャンプが確認された。降雨流出係数については、2010年以降に正のジャンプがみられた。降雨流出係数は、線形トレンドでは徐々に上昇する傾向がみられたが、ジャンプと判定されるような大幅な平均値の変化は1回のみであった。

(2) 降雨流出係数変化の地域性

全観測地点を対象に、1962年以降の降雨流出係数について長期トレンドと平均値の変化（ジャンプ）を調べた。まず、線形トレンドの有意性について、データに正規性のない留萌以外を対象に t 検定を行った。その結果、北見枝幸、雄武、紋別、網走、釧路に有意な増加傾向が認められた。次に、全地点について、Mann-Kendall検定で長期トレンドを調べたところ、岩見沢、雄武、紋別、釧路に有意な増加傾向が認められた。札幌は、1889年からのデータでは有意な増加傾向がみられたが、この期間のデータだけで検定すると有意性はなかった。さらに、全地点について、平均値の推移に大きな変化（ジャンプ）が生じていないか前節と同様の方法で検定を行った。その結果、胆振地域と道南地域の6地点、十勝地域の2地点

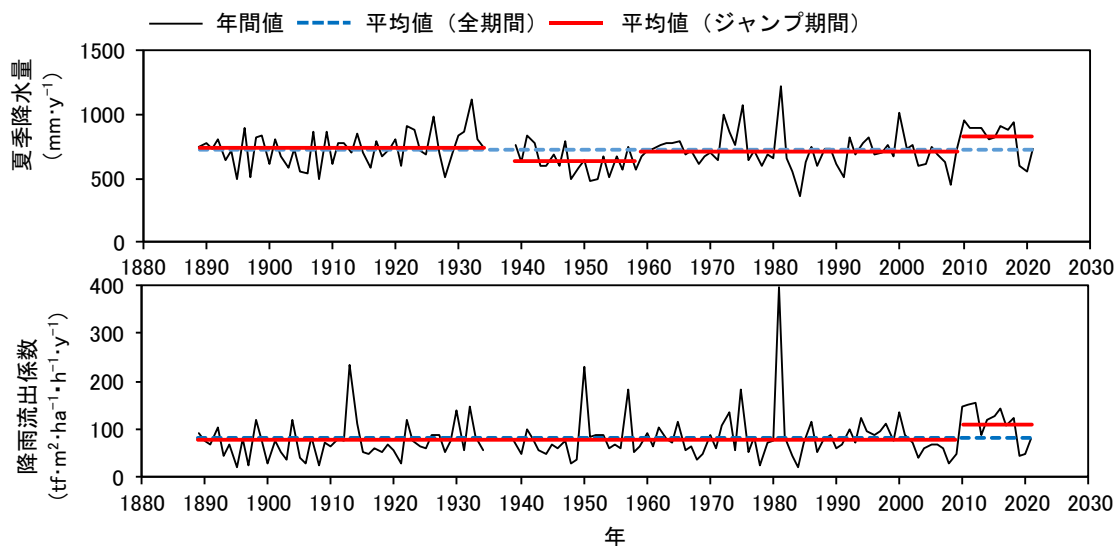


図-3 札幌の夏季降水量と降雨流出係数の平均値のジャンプ

と羽幌以外では、2000年代以降に正のジャンプが検出された。

以上から、降雨流出係数変化の地域性は以下にまとめられる（図-4）。①期間を通して増加傾向にあり、かつ2000年代に入って平均値に正のジャンプがあったのは、オホーツク海沿岸地域（北見枝幸、雄武、紋別、網走）と釧路であり、②期間を通して有意な傾向がなく、かつ平均値にも正のジャンプが無い地域は十勝（帯広、広尾）と太平洋岸西部（苫小牧、室蘭）から渡島半島（倶知安、寿都、函館、江差）であった。岩見沢は①に、羽幌は②に該当する結果であったが、近隣地点と傾向が異なっており、地域性が特異点かどうか判然としない。最後に、上記以外の地点は、平均値に正のジャンプがみられたが、長期的なトレンドはなかった。これら地点は全道に散らばっているが、日本海側の中部以北に多く位置（小樽、札幌、留萌、稚内）している傾向が確認できる。

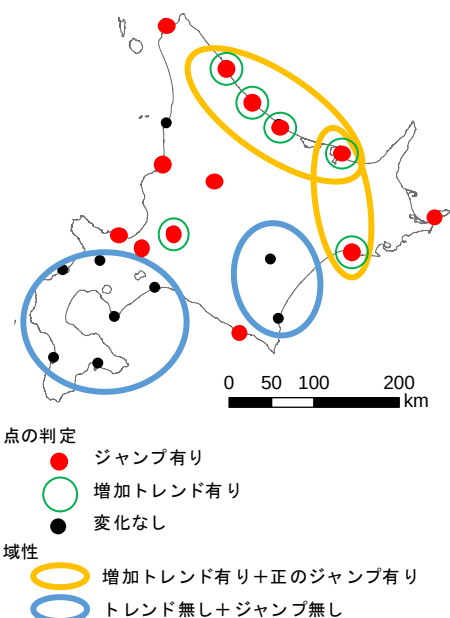


図-4 降雨流出係数変化の地域性

4. まとめ

本研究では、北海道内における主要な気象庁の気象観測点22箇所を対象に、農業農村整備事業の計画設計で用いられる土壌流亡量予測式USLEで用いられる降雨係数について、侵食性降雨から算出される降雨流出係数の長期トレンドと平均値のジャンプの有無を整理した。

4月～11月の1時間降水量データが1889年からある札幌の降雨流出係数は、係数値が年々上昇（増加トレンドあり）して2000年代以降平均値が大幅に上昇（平均値にジャンプあり）していた。また、全地点における1962年以降の降雨流出係数には、増加トレンドや平均値のジャンプが検出された地点（13地点）がある一方、有意な変動がない地点（9地点）もあるなど、地域性が認められた。

今後、本研究で得られた結果をもとに、気候変動に対応した道内全域の降雨係数を提案する予定である。

参考文献

- 1) 菊池渉、村上泰啓、石谷隆始：北海道内の気候区別にみた豪雨傾向の経年特性について、土木学会第64回年次学術講演会、pp.341-342、2009.
- 2) 札幌管区気象台：「日本の気候変動2020」に基づく北海道の気候変動、2022.
<https://www.data.jma.go.jp/sapporo/bosai/publication/kiko/kikohendo2020/kikohendo2020.html>（2022年6月14日確認）
- 3) Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. : Predicting Rainfall Erosion Losses, Agriculture Handbook 537, pp.3-4, 1977.
- 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）、pp.158-178、1992.
- 5) 山元龍三郎、岩嶋樹也、サンガ NK、星合誠：気候ジャンプ、京都大学防災研究所年報、第29号 B-1、pp.297-312、1986.