

気候変化予測モデルによる土壌流亡リスクの検討

株式会社 ズコーシャ ○高田 直幸 丹羽 勝久 米山 晶
十勝総合振興局 産業振興部 調整課 片桐 俊英

1 はじめに

鹿追町は、十勝総合振興局管内の北西に位置し、火山性土壌が広く分布する耕地面積12,200haの畑酪混合地域であり、小麦・てんさい・ばれいしょ・豆類の輪作を中心にキャベツ等の野菜を取り入れた畑作経営と酪農経営が行われている。

町内は然別川が南北に貫流し、その東側は北高南低で緩やかな波状を呈する扇状地形が、西側は侵食の大きい台地が広がっている(図-1)。

鹿追アメダスにおける観測史上10位までのランキングに、2000年以降の年降水量が5件、日降水量は6件が含まれており、局地的な降雨も増加傾向にあるなど、地球温暖化による降雨形態の変化が顕在化している。そのため、土壌の流亡による農地や排水路の被害、大雨による排水路施設被害、農業機械の大型化に伴う作土直下の堅密化による排水不良等、地域が抱えるリスクの増大が懸念されている。

このような背景から、平成24年3月、十勝総合振興局、鹿追町、JA等の関係機関で構成する鹿追地域農業生産基盤整備方向検討会が設立され、農地・排水路の総合的排水対策に取り組むこととなった。本報告は、その一環として実施した委託業務から、土壌流亡量算定と気候変化予測モデルを用いた将来的なリスク算定について報告するものである。

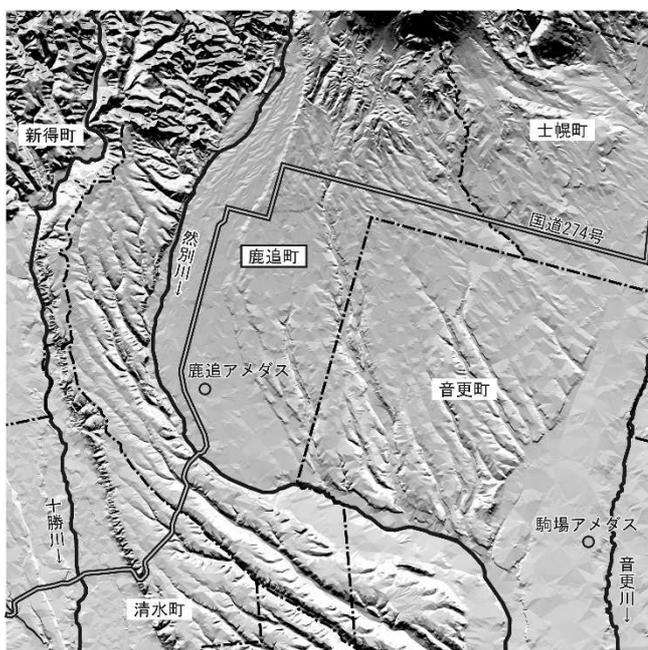


図-1 位置図(段彩陰影図)

2 調査方法

2.1 気候変化予測モデル

一般に気候変化の予測には、大気・海洋結合大循環モデル(Atmosphere-ocean coupled general circulation model : CGCM)が用いられる。CGCMとは、大気現象、海洋現象などの物理的法則が互いに作用することで地球環境が形成されるという仮定に基づき、人為的な温室効果ガスの排出による影響をシミュレートする手法である。このことから、気象の将来予測には、「将来、人為的影響によりどの程度、温室効果ガスが排出されるのか」というシナリオ策定が重要となる。このため、気候変化に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC)では2000年に様々な気候変化シナリオ(SRES)を作成しており、第4次評価報告書(2007)では6種類のSRESと様々なCGCMにより気候変化予測が行われている。

各シナリオの概略は下記のとおりである。

- A1FI : 化石エネルギー源を重視しつつ、高い経済成長を実現する社会
- A2 : 経済の地域ブロック化と高い人口増加を実現する社会
- A1B : すべてのエネルギー源のバランスを重視しつつ高い経済成長を実現する社会
- B2 : 経済、環境の持続可能性を確保した地域共存型社会
- A1T : 非化石エネルギー源を重視しつつ、高い経済成長を実現する社会
- B1 : 環境保全と経済の発展が地球規模で両立する社会

我が国で開発された CGCM としては、①国立大学法人東京大学気候システム研究センター、独立行政法人国立環境研究所、独立行政法人海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターの合同研究チームによる CGCM(K-1 model developers,2004)、②気象庁気象研究センターの CGCM(Yukimoto and Noda,2000)が挙げられる。

前者からは MIROC3.2(hires)と MIROC3.2(medres)という 2 種の CGCM を用いた計算結果が、後者からは MRI CGCM2.3.2 という CGCM を用いた計算結果が、IPCC に提出されている。

各国の CGCM の中でも、MIROC3.2(hires)は気象予測値を最も高解像度(緯度×経度=1.1° ×1.1° (約 125km 四方))で計算したモデルであり、独立行政法人農業環境技術研究所の研究グループが、その A1B と A2 シナリオの計算結果に線形内挿(ダウンスケール)を行い、3 次メッシュ(1km 四方)の気象予測値のデータセットを公表している(Okada *et al.*,2009)。

このデータセットは、スギ林の炭素蓄積量の将来予測(松本・光田,2009)、ブナ林やハイマツの生育域の将来変化(田中,2009)、コメの収量変動(横沢ら,2009)等、様々な気候変化の研究にも利用されている。

また、地球温暖化予測情報 第 8 卷(気象庁,2013)では、A1B シナリオを基にした日本の気候変化予測を示していることを踏まえ、本事例でも、A1B シナリオと MIROC3.2(hires)を用いた気象予測値を用いることとし、独立行政法人農業環境技術研究所から 2001～2100 年の最高気温、最低気温、降水量、日射量、湿度、風速の日単位データを入手した(以降、予測値と記述)。なお、入手したデータは累積密度関数(cumulative density function:CDF)に基づくバイアス補正が行われている(Iizumi *et al.*,2010)。

2.2 土壌流亡量予測式 (USLE)

水食による農地からの土壌流亡量は、各種情報を GIS で一元化したうえで、土地改良事業計画指針 農地開発(改良山成畑工)(1992)(以降、農地開発指針と記述)および(独)緑資源機構の農地・土壌侵食防止対策技術指針(2004)(以降、緑資源指針と記述)に示されている土壌流亡予測式(USLE)を用いてほ場毎に求めた。また、ほ場毎に算定される土量を集計することで鹿追町における土壌流亡の現状量と将来予測量を算出した。なお、緑資源指針は、Soil and Water Conservation Engineering(第 4 版)を基に作成された資料であり、SI 単位を用いているのが特徴である。

農地の水食による年間流亡土量を予測する土壌流亡予測式(USLE)を以下に示す。

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

A：単位面積あたり流亡土量。(t ha⁻¹ y⁻¹)

R：降雨係数。降雨侵食指数 EI 値の年間合計(MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹)

K：土壌係数。土壌固有の係数(t h MJ⁻¹ mm⁻¹)

L：斜面長係数。基準斜面長(20m)に対する比率

S：傾斜係数。基準勾配(5°)に対する比率

LとSを統合して地形係数として取り扱うことが多い

C：作物係数。作物別の係数

P：保全係数。畝立て方向、等高線栽培など保全的耕作の効果を示す係数

2.3 各係数の設定方法

(1) 降雨係数 R

降雨係数は、侵食性降雨ごとの総降雨エネルギーEとその降雨の最大30分間降雨強度I₃₀との積EI₃₀の年間合計値と定義されている。一般に、降雨係数はデータの入手しやすい時間雨量データから算定するとされているが、10分間データなど短時間雨量データから算出する降雨係数は、時間雨量データから算出した降雨係数の1.37~1.85倍であると報告されている(鶴木ら,2013)。すなわち、時間データから降雨係数を算出すると値が小さくなる問題があることから、本報告ではアメダス10分値データを利用した。ただし、検討対象地域が鹿追町の農地全域(122km²)であるのに対し、近傍のアメダスは図-1に示す鹿追と駒場の2地点であることから、降雨の面的な傾向を反映させるため、現在値の算定に当たっては予測値と同じ空間解像度を持つ1kmメッシュ気象データ(最小時間単位は1時間)を(一財)日本気象協会から入手して利用した。なお、農地開発指針では融雪に伴う多量の土壌流亡を補正するため、根雪月の降水量に0.06を乗じた値を加算するとされている。このことから、近傍気象官署の根雪(長期積雪)平年値12月10日~3月21日(帯広)を勘案し、12月~3月の降水量を用いて降雨係数を補正した。

降雨係数の算定式を以下に示す。

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n (E_i \times I_i) \quad \text{式-1}$$

R：降雨係数(MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ y⁻¹)

R_i：降雨係数(各降雨) = E_i × I_i (以降、10分データを用いる場合はR_{i10}、1時間データを用いる場合はR_{i60}と記述する)

i：対象年におけるi番目の降雨イベント(積算降水量≥12.7mm、降雨開始後無降雨が6時間以上続くと次の降雨イベントとする)

n：対象年の降雨イベント回数

E_i：i番目の降雨イベントにおける運動エネルギー(MJ ha⁻¹)

I_i：i番目の降雨イベントにおける最大30分間降雨強度(降雨強度 mm h⁻¹)

10分データを用いる場合は、降雨イベントにおける最大30分間雨量(mm)×2であり、1時間データを用いる場合は、最大時間雨量である。

降雨イベントにおける運動エネルギーの算定式を以下に示す。

$$E_i = \sum_{a=1}^T [0.119 + 0.0873 \log(I_a) \times r_a] \quad \text{式-2}$$

i 番目の降雨イベント時間内における、

I_a : a 番目の降雨強度(mm h⁻¹)

10 分データを用いる場合は 10 分間雨量(mm)×6 であり、1 時間データを用いる場合は各時間の雨量である。

r_a : a 番目の降水量(mm)

T : 降雨イベント終了までのデータ数

式-1~2 を用いて、アメダスの 10 分値データに基づく降雨係数 R_{i10} と 1 時間データに基づく降雨係数 R_{i60} の回帰式を求めて、1km メッシュ気象データによる R_{i60} を R_{i10} に変換した。

一方、予測値は最小単位が日データであり、日データを時間データまでダウンスケーリングすることは困難であるため、アメダス地点における月間降水量(r_m)と 10 分間降雨係数 R_{i10} から算定した月間降雨係数(R_m)の相関を確認し、予測値の月間降水量を月間降雨係数に変換し、年合計して降雨係数を算定した。

(2) 土壌係数 K

土壌係数は、谷山(2003)の方法と緑資源指針に示された式-3 を用い、調査区域の各土壌統(全 11 統)を対象として算出した。そのうち、地域の代表である 2 土壌統(表層腐植質黒ボク土、厚層多腐植質多湿黒ボク土)については、土壌調査および分析を行い、その結果を用いた。その他の土壌統については十勝総合振興局が過去に実施した調査結果を活用した。なお、式-3 に用いる粒径は USDA 法の区分(シルト 0.05~0.002mm、極細砂 0.1~0.05mm、粘土 0.002mm 以下)である。

$$K = 2.8 \times 10^{-7} M^{1.14} (12 - a) + 4.3 \times 10^{-3} (b - 2) + 3.3 \times 10^{-3} (c - 3) \quad \text{式-3}$$

M : (シルト含量% + 極細砂含量%) × (100 - 粘土含量%)

a : 表層土の腐植含量(%) ただし、腐植含量の最大値は 12%とした。

b : 表層土の土壌構造コード(表-1)

c : 土壌断面の透水性級位(表-2)

表-1 表層土の土壌構造コード

土壌構造	説明	USLEの土壌構造	コード(b)
平板状		blocky, platy or massive(塊・板・壁状)	4
柱状		blocky, platy or massive(塊・板・壁状)	4
等方状		blocky, platy or massive(塊・板・壁状)	4
塊状 (角塊状を含む)	2cm以上の大きさのもの	blocky, platy or massive(塊・板・壁状)	4
細塊状	2cm以下の大きさのもの	blocky, platy or massive(塊・板・壁状)	4
粒状	2mm以上の大きさのもの	med. or coarse granular(中・粗粒状) 2~10mm	3
細粒状	2mm以下の大きさのもの	fine granular(小粒状)1~2mm	2
単粒状	個々の粒子が連結されていないもの	very fine granular(細粒状)~1mm	1
連結状	粒子または構造単位が均質状に連結されているもの	blocky, platy or massive(塊・板・壁状)	4
固化状	構造が破壊されて固化したもの	blocky, platy or massive(塊・板・壁状)	4

表-2 土壌断面の透水性級位

飽和透水係数の区分	USLEの区分	級位(C)
10^{-2} cm/sec~	rapid	1
$10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/sec	mod. to rapid	2
$10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/sec	moderate	3
$10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/sec	slow to mod.	4
$10^{-6} \sim 10^{-5}$ cm/sec	slow	5
$\sim 10^{-6}$ cm/sec	very slow	6



図-2 流水経路とLSの設定

(3) 地形係数 LS

地形係数は、十勝総合振興局提供のほ場図と国土地理院が公開している 10m メッシュ標高を基に、GIS(MicroImages,Inc TNT-mips)の流水経路作成機能を利用して流路長(l)とその流路高低差から算定する勾配(θ)

を求め、農地開発指針の式(式-4)を用いて LS を決定した。なお、ほ場内に複数の流水経路がある場合は、そのうちの最大 LS をほ場の代表値として採用し(図-2)、流水経路が無い場合は、重心付近の傾斜ベクトルを用いて LS を算定した。

$$LS = \left(\frac{l}{20.0} \right)^{0.5} (68.19\sin^2\theta + 4.75\sin\theta + 0.068) \quad \text{式-4}$$

ここに、 l : 斜面長(m) θ : 勾配(degree)

(4) 作物係数 C

今回算定する土壌流亡量は年ごとの値ではないため、本地域の輪作体系(小麦・てんさい・ばれいしょ・豆類の4品)を考慮して、農地開発指針に示された主な畑作物の作物係数(表-3)から平成 23 年度の作付面積による加重平均値(0.363)を作物係数とした。ただ

表-3 各種作物の作物係数

作物	作物係数	作物	作物係数
牧草	0.02	トウモロコシ	0.4
コムギ	0.2	テンサイ	0.4
キャベツ	0.3	ダイズ	0.4
バレイショ	0.3	インゲン	0.5
ソバ	0.3	アズキ	0.5

農地開発指針より抜粋

し、牧草は比較的作付が固定されていることから、牧草の係数を使用した。

なお、本地域においては、ほ場毎の作付が管理されていないため、牧草地は衛星画像(SPOT5号 2007.4.29)によるスペクトル分析と現地確認を併用して決定した。

(5) 保全係数 P

鹿追町の大部分は、ほ場長辺方向と傾斜方向が一致していることから、表-4 に示す上下耕($P=1.0$)として計算した。なお、横畝栽培の導入による土壌流亡抑制効果の算定に当たっては、畑面の勾配別保全係数を採用した。

表-4 保全係数

畑面の勾配	横畝栽培	平畝・上下耕
$1^\circ \sim 4^\circ$	0.27	1.0
$4^\circ \sim 7^\circ$	0.30	
$7^\circ \sim 10^\circ$	0.40	
$10^\circ \sim 15^\circ$	0.45	
$15^\circ \sim 25^\circ$	0.50	

農地開発指針より抜粋・加筆

3 調査結果

3.1 降雨係数の算定結果

アメダスの10分値データに基づく降雨係数 R_{i10} は、1時間データに基づく降雨係数 R_{i60} の1.40倍(鹿追)、1.43倍(駒場)となり、鶴木ら(2013)の指摘通り、1時間データは降雨係数を過小評価することが改めて示された。

一方、予測値の降雨係数を算定するための相関は、月間降水量(r_m)が大きいほどばらつく傾向であるが、2次式における決定係数は0.82(鹿追)、0.76(駒場)と強い相関関係を確認できたことから、予測値の月間降水量(r_m)から月間降雨係数(R_m)を算定した。

アメダス鹿追地点の回帰式を図-3、図-4に示す。

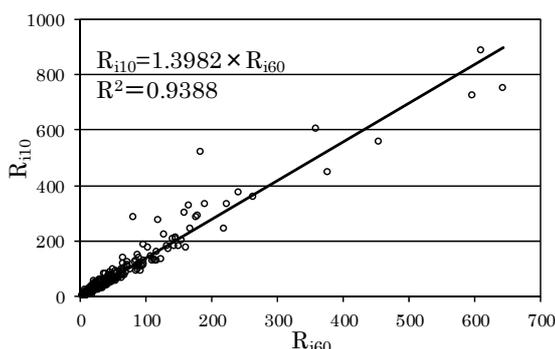


図-3 R_{i60} と R_{i10} の比較

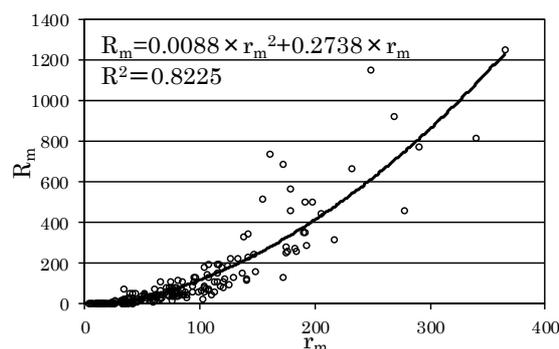


図-4 月間降水量と月別降雨係数の比較

3.2 土壌係数の算定結果

既存資料では、土壌係数算定に必要な腐植含量、透水係数、粒径の一部が未調査であったため、各種文献等から不足項目を推定し、土壌係数を算定した(表-5)。

表-5 土壌係数算定結果

土壌グループ	土壌タイプ	土壌係数K ($t h M J^{-1} m m^{-1}$)		備考*
		本調査で算定	谷山(2003)	
① 火山性土	厚層多腐植質黒ボク土	0.019	0.001	火山性土
	表層腐植質黒ボク土	0.019	0.011	火山性土
	厚層多腐植質多湿黒ボク土	0.013	0.012	火山性土
	厚層腐植質多湿黒ボク土	0.033	0.019	火山性土
② 洪積土	細粒褐色森林土	0.042	0.028	表層に火山灰土層(厚さ20cm未満)
	細粒灰色台地土	0.013	0.040	表層に火山灰土層(厚さ20cm未満)
③ 沖積土	細粒褐色低地土	0.015	0.050	表層に火山灰土層(厚さ20cm未満)
	中粗粒褐色低地土	0.060	0.056	表層に火山灰土層なし
	礫質褐色低地土	0.024	0.048	表層に火山灰土層(厚さ20cm未満)
	礫質灰色低地土	0.015	0.045	表層に火山灰土層(厚さ20cm未満)
	礫質強グライ土	0.015	0.044	表層に火山灰土層(厚さ20cm未満)

*北海道立中央農業試験場(1993):北海道土壌区一覧、北海道立中央農業試験場(1979):北海道の農牧地土壌分類 第2次案に基づいて整理

谷山(2003)は、黒ボク土の土壌係数がライシメーター試験結果より低く算定される特徴があるため、特殊土壌の土壌係数はさらなるデータの蓄積が必要としている。しかし、地

域に分布する土壌の特徴を加味した土壌係数は、流亡リスクを示す一定の指標としての意義があることから、表-5 に示した本調査の土壌係数を用いることとした。

3.3 土壌流亡量の算定結果

(1) 単位流亡量分級図からみた傾向

前項までで決定したほ場毎の各パラメータと 4 区分の降雨係数(現状値：2002 年～2011 年の平均、予測値 2040：2031～2040 年の平均、予測値 2070：2061～2070 年の平均、予測値 2100：2091～2100 年の平均)を用いて単位流亡量($t \cdot ha^{-1} \cdot y^{-1}$)を算出し図化した(図-5)。なお、図に示している 4 つの地域(鹿追、瓜幕、美蔓、幌内)は、地形(傾斜)、土壌分布、国営事業の実施区域を勘案して設定したものである。

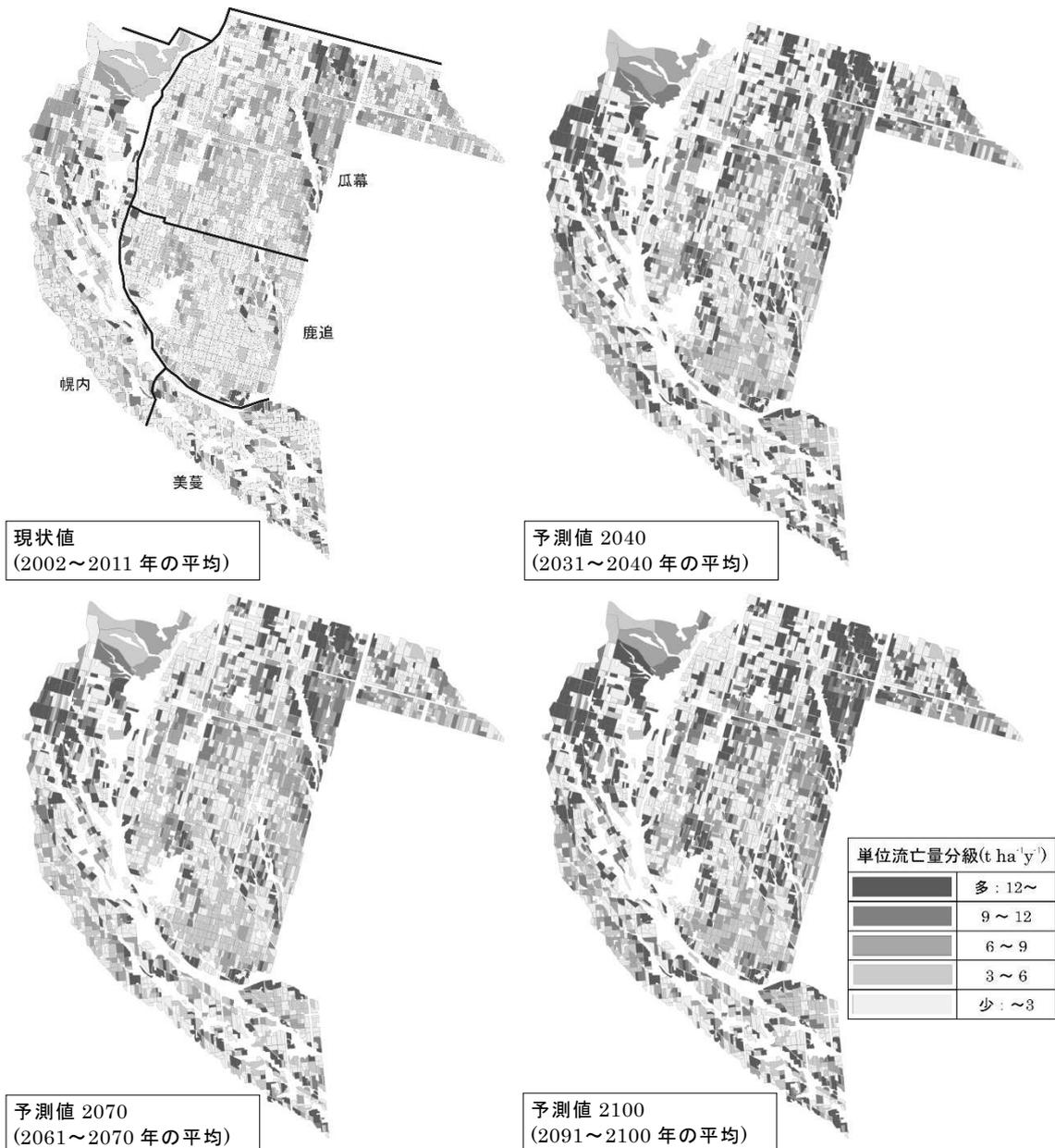


図-5 単位流亡量分級図の遷移(現状～2100年)

図-5 から、瓜幕地域と幌内地域は北側に流亡量の多いほ場が集中しており、鹿追地域と美蔓地域では河川に近い一部のほ場で流亡量が多いことが明らかになり、対策を重点的に進めるべき地域が明確となった。

また、現状の土壌流亡量は 48,529(t y⁻¹)であるが、2040 年で現状の 2 倍となり、2070 年には一旦減少するものの 2100 年には、現状の 2.2 倍まで上昇する結果となった(表-6)。さらに、横畝栽培を導入した場合の試算から、2100 年の流亡量は現状の約 8 割に抑制できる結果となり、土壌流亡対策は気候変化に伴って重要性を増すことが明らかとなった。

ただし、横畝栽培の導入に当たっては、農地再編整備事業等による換地や排水路・暗渠等の一体的な整備が必要となる。

表-6 土壌流亡量算定結果

ほ場数	面積 (ha)	平均 ほ場面積 (ha)	現状の流亡土量 (t y ⁻¹)		将来の流亡土量(t y ⁻¹)					
			合計	haあたり	2040年		2070年		2100年	
					合計	haあたり	合計	haあたり	合計	haあたり
3,165	12,267	3.88	48,529	3.96	98,602 (2.03)	8.04	80,190 (1.65)	6.54	107,484 (2.21)	8.76
横畝栽培の導入					35,024 (0.72)	2.86	28,436 (0.59)	2.32	38,182 (0.79)	3.11

※()は現状の流亡土量に対する比率

なお、現状値の妥当性を検証するため、鹿追アメダスにおける総雨量 67mm の降雨(2012.11.6~8)後に現地で流亡状況を確認した結果、流亡量が多いと算定された地域でガリ侵食が発生していた。また、関係機関からも流亡が多い地域の傾向が算定結果と一致していることを確認している。

(2) リスク軽減のための対策(瓜幕地域の例)

委託業務では 4 つの地域(鹿追、瓜幕、美蔓、幌内)において土壌流亡リスク軽減のための対策を示したが、ここでは代表として瓜幕地域について述べる。

瓜幕地域の USLE パラメータと流亡土量を表-7 に示す。

表-7 瓜幕地域の土壌流亡量(現状値)

土壌タイプ	面積 (ha)	土壌係数	傾斜 (度)	地形係数	流亡土量 (t y ⁻¹)	単位流亡土量 (t ha ⁻¹ y ⁻¹)
			平均		平均	合計
表層腐植質黒ボク土	3,111	0.019	1.64	0.70	15,201	4.89
厚層多腐植質多湿黒ボク土	628	0.013	1.86	0.74	1,655	2.64
細粒灰色台地土	53	0.013	1.07	0.46	91	1.72
細粒褐色低地土	561	0.015	1.02	0.55	1,165	2.08
中粗粒褐色低地土	24	0.060	0.91	0.36	32	1.32
礫質褐色低地土	592	0.024	1.09	0.55	1,635	2.76
礫質灰色低地土	26	0.015	0.98	0.65	41	1.60
合計	4,994				19,820	

本地域は、流亡土量および単位流亡土量ともに表層腐植質黒ボク土が最も多い。この土壌は地形係数が高いことから、傾斜改良が最も効果的である。ただし、表層腐植質黒ボク

土は一般に有効土層が厚い土壌と位置づけられるが、現地調査で下層に礫を富む土層が認められたため、表層腐植質黒ボク土区域内においても、局所的に礫を含む土層が出現すると考えられる。そのため、基盤を切盛する際には立地土壌における礫の混入程度を把握し、礫を作土に混入させない配慮が必要である。

傾斜改良を行えない場合は、斜面長の短縮(圃場中央を横断する小排水路の配置)、横畝栽培の実施、牧草作付などの効果が高い。これらを実施する場合は、耕作者に十分な理解と協力を求める必要がある。

また、土壌調査の結果、発達程度は強くないものの耕盤層が認められたため、降雨時に発生する余剰水を作土以深に速やかに排除できるような管理(定期的な心土破碎等)も重要である。

4 まとめ

本報告では、1km メッシュの気象データや 10m メッシュの標高データ等、空間解像度の高いデータを GIS で一元化し、ほ場毎に USLE の各係数と土壌流亡量を算定した。これによって、どの地域の土壌流亡リスクが高いか、すなわち、土壌流亡対策を行う地域の優先順位を示すことができた。また、横畝栽培の導入による土壌流亡量の削減効果を試算するとともに、地域の土壌や地形の特徴を踏まえた土壌流亡リスクの軽減策(傾斜改良、小排水路の配置、作付の変更)も提示した。これらを、平成 25 年 4 月に実施した鹿追地域農業生産基盤整備方向検討会に報告することで、将来に対する備えの重要性と耕作者の協力が重要な点を認識していただくきっかけとなった。

5 今後の課題

本報告は、MIROC3.2(hires)という一つの気象・海洋結合大循環モデルによる気象予測値を用いた結果であり、気象予測には不確実性の問題を内在していることに留意が必要である。例えば、IPCC(2007)の第 4 次報告書の中でも、不確実性が議論されており、気温上昇や海面上昇等、各モデルの予測値には大きな予測幅を有していることが示されている。

しかしながら、これらの気象予測モデルも日進月歩であることから、今後の展開としては、新たな気象予測値が公表された段階で、本調査結果を更新していくことが重要である。

また、USLE に用いる各係数については、様々な研究が行われているものの、実際の流亡量把握が困難であることも一因となって、流亡量の目安を算定しているのが現状である。本報告では地域特性を把握するため、可能な限り現地のデータを活用したが、黒ボク土の土壌係数が低く算定されるなどの課題もある。このため、全国で行われている研究成果の収集や実験的検討により係数を精緻化していくことが今後の課題である。

【参考文献】

- 1) Glenn, O. Schwab, Delmar, D. Fangmeier, William, J. Elliot, Richard, K. Frevert (1993): Water Erosion and Control Practices, Soil And Water Conservation Engineering, 4th ed., Jhon Wiley & Sons, p.91-113
- 2) 北海道立中央農業試験場(1993): 北海道土壌区一覽, 北海道立農業試験場資料, 21, 123pp <http://www.agri.hro.or.jp/center/kankoubutsu/shiryuu/21/21all.pdf>, (参照 2013-09-19)

- 3) 北海道立中央農業試験場(1979): 北海道の農牧地土壌分類 第2次案, 北海道立農業試験場資料, 10, 89pp. <http://www.agri.hro.or.jp/center/kankoubutsu/shiryou/10/10all.pdf>, (参照 2013-09-19)
- 4) 飯泉仁之直・西森基貴・石郷岡康史・横沢正幸(2010): 統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門, 農業気象, 66(2), 131-143, https://www.jstage.jst.go.jp/article/agrmet/66/2/66_2.5/_pdf, (参照 2013-09-19)
- 5) IPCC(2007): Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp. <https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/wg1-ar4.html>, (参照 2013-09-19)
- 6) K-1 model developers (2004): K-1 coupled GCM (MIROC) description. K-1 technical report, 1, Hasumi, H. and Emori, S. eds., Center for Climate System Research, University of Tokyo, 34pp. http://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~hasumi/miroc_description.pdf, (参照 2013-09-19)
- 7) 気象庁(2013): 地球温暖化予測情報, 第8巻, 88pp. <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpinfo/GWP/index.html>, (参照 2013-09-19)
- 8) 松本光朗・光田靖(2009): 吸収源としての森林の役割-2050年への展望~日本の森林・林業のフルカーボンモデルによる将来予測から~, 平成21年度 独立行政法人森林総合研究所 公開講演会, 11-16 <http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/kouenyoushi/documents/h21.pdf>, (参照 2013-09-19)
- 9) 緑資源機構(2004): 農地・土壌侵食防止対策技術指針 <http://www.green.go.jp/green/gyoumu/kaigai/manual/bolivia/>, (参照 2013-09-19)
- 10) 農林水産省構造改善局計画部(1992): 土地改良事業計画指針 農地開発(改良山成畑工), 158-178
- 11) Okada, M. Iizumi, T. Nishimori, M. and Yokozawa, M.(2009): Mesh climate change data of Japan Ver.2 for climate change impact assessments under IPCC SRES A1B and A2. Journal of Agricultural Meteorology, 65(1), 97-109. https://www.jstage.jst.go.jp/article/agrmet/65/1/65_65.1.4/_pdf, (参照 2013-09-19)
- 12) 田中信行(2009): 温暖化で危惧される自然林への影響, 平成21年度 独立行政法人森林総合研究所 公開講演会, 17-22 <http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/kouenyoushi/documents/h21.pdf>, (参照 2013-09-19)
- 13) 谷山一郎(2003): 農耕地からの表面流去水の発生に関わる土壌要因の解明とMIの策定, 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, 研究成果, 414, 149-152 <http://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2039014597.pdf>, (参照 2013-09-19)
- 14) 鶴木啓二・小檜山雅之・中村和正(2013): アメダスデータによる北海道全域の降雨係数の算出, 国土交通省北海道開発局 第56回(平成24年度)北海道開発技術研究発表会, <http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/gijyutu/giken/h24giken/JiyuRonbun/GT-39.pdf>, (参照 2013-09-19)
- 15) Yukimoto, S. and Noda, A. (2002): Improvements of the Meteorological Research Institute Global Ocean-atmosphere Coupled GCM (MRI-CGCM2) and its climate sensitivity. CGCR's Supercomputer Activity Report, 10, 37-44, http://www.mri-jma.go.jp/Dep/cl/cl4/publications/yukimoto_CGER2002.pdf, (参照 2013-09-19)
- 16) 横沢正幸・飯泉仁之直・岡田将誌(2009): 気候変化がわが国におけるコメ収量変動に及ぼす影響の広域評価, 地球環境, 14(2), 199-206 http://www.airies.or.jp/attach.php/6a6f75726e616c5f31342d326a706e/save/0/0/14_2-10.pdf, (参照 2013-09-19)