多時期の空中写真から作成された数値表層モデルを用いた 放牧草地における土壌侵食の地形解析

Geomorphic analysis of soil erosion using digital surface model by multi-temporal aerial photographs in grazed pasture

鈴木 公人*・嶋 栄吉**・嶋田 浩***・田中 勝千**・真家 永光**

*Kimihito SUZUKI, Eikichi SHIMA, Hiroshi SHIMADA
Katsuyuki TANAKA and Nagamitsu MAIE*

Abstract : We surveyed soil erosion and slope failure in a grazed pasture in South Hokkaido using digital surface model (DSM) for geomorphic analysis, also, estimated about adaptation to a monitoring in a grazed pasture using DSM. In this study, DSMs were extracted by multi-temporal aerial photographs and digital photogrammetric technique. Digital elevation model (DEM) was extracted by contour map of paper for accuracy validation of DSM absolute accuracy. As a result of DSM accuracy evaluation on the basis of DEM, in all the ages, root mean square deviation of height direction were with satisfactory accuracy. Using extracted multi-temporal DSMs, large-scale soil erosion and slope failure were able to be performed. In addition, growths of grass were able to be grasped. However, it was difficult to extract the minute geomorphic change formed in the grazed pasture. Application of photogrammetric technique to monitoring of grazed pasture definite showed may be able to contribute to preservation of a grazed pasture, and maintenance.

Keywords : Soil Erosion, Digital Surface Model, Grazed Pasture

1. はじめに

昭和40年代から展開された大規模草地造成事業により、全国に1,400カ所余りの公共牧場が開かれた。平成20年度には、862カ所にまで減少しており、その原因としては、預託頭数の減少とともに、傾斜草地が多く効率的な草地の利用・管理が困難なことが考えられる(加納ら, 2004)。特に、粗放的な管理システムと家畜の踏圧により恒常的に負荷を与えられた傾斜放牧草地においては、家畜踏傷、植生劣化等に伴う裸地化などによる土壌侵食が顕在化しており、草地の維持、管理上の

問題となっている(北海道開発局, 1998)。たとえば、家畜の踏圧による牛道の形成は、草地を裸地化させ、リルやガリ侵食の発生要因となり、草地からの土壌流出量の増大を引き起こす(竹内, 1996; 山本ら, 2006)。傾斜草地の健全な利用、管理を行うためにも、草地の荒廃化の把握とその対策の検討が求められている。

土壌侵食やその防止に関する研究は古くから行われてきた(満鉄調査局, 1943)。裸地や農耕地においては、土壌侵食の発生、発達が著しいことから、Hudson (1971)、高山 (1974)、高木ら (1978)、三原ら (1999)、Wells et al. (2009) など国内外で研究が蓄積されてきた。しかし、林地や放牧草地など年間を通して地表面が植物に覆われている土地では、降雨流出の遅延機能とピーク緩和機能を有しており(森脇, 1983)、土壌侵食による流亡土壌量は農地や裸地斜面に比べ非常に少ないと言われている(ホリー, 1983; 山本, 2004)。そのため、現在では放牧草地における土壌侵食に関する研究事例は少ないのが現状である。さらに、放牧草地を対象とした草地、土壌保全に関する研究としては、大規模草地造成事業が展開された昭和40年代から50年

* 北里大学大学院獣医学研究科生物生産環境学専攻
Graduate School of Veterinary Medicine & Animal
Sciences, Kitasato University.

** 北里大学獣医学部生物環境科学科
School of Veterinary Medicine, Kitasato University.

*** 秋田県立大学生物資源科学部アグリビジネス学科
College of Bioresource Sciences, Akita Prefectural
University.

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 49, NO. 4, 2010

代にかけて、実態調査に基づく研究が永井ら（1973）、加甲ら（1977）、井戸ら（1978）、石田ら（1980）、辻ら（1987）によって報告されているが、それらの研究は、造成に伴う草地への影響または、造成初期における土壌侵食および牛道の発生を論じているものがほとんどで、侵食や牛道の発生状況を詳細に把握した例は少なく、経年的な放牧草地の変遷の調査は行われていない。

放牧草地における侵食を把握する上で、地形情報を広域にわたり面的に取得することが重要である。従来、面的な地形を把握するには紙に印刷された地形図（以下、紙地形図）が用いられてきた。しかし、紙地形図では、地形情報の基礎的なデータとはなるものの、地形の表現力に乏しく、正確な地形変化を読み取ることはできなかった。また、地表の情報を広域かつ面的に取得してきたデータとして空中写真がある。都市部では国土地理院が、森林域では林野庁が、昔から航空機による空中写真を定期的に撮影しており、今後も定期的に撮影される可能性が高い。従来から写真測量の技術を用いて、地図作成やオルソフォトの作成に活用されてきた（渡辺，1993）。最近では、デジタル写真測量技術の発展によって、空中写真から3次元情報である数値表層モデル（Digital Surface Model 以下、DSM）の高精度な自動作成が可能となった。DSM および地形の形状を捉えた数値標高モデル（Digital Elevation Model 以下、DEM）は、紙地形図、空中写真に次ぐ第三の基礎データとして、地形学、水文学などの分野でも活用されている（中山，2000）。

DEM を地形解析のための基礎データとして用いた例としては、各時期の DEM を比べ、得られた標高変化量を用いての火山の地形変化解析（長谷川ら，2004；佐藤，2004）、DEM を利用した地震後の地すべりや斜面災害発生箇所の抽出（力丸，2005）、5 m メッシュの DEM を用い算出した集水度による斜面崩壊の危険度評価（福本ら，2008）、などが研究されており、DEM は過去と現在の地形を再現性の高い形で定量的に表現することを可能とした。

放牧草地においても、過去と現在の画像から取得された数値標高モデルを用い、土壌侵食の地形解析を行い、地形的特徴を把握できると考えた。草地の地形をモニタリングすることは、家畜や草地の管理、草地保全を考える上で重要な情報となる。また、放牧地への写真測量の適用は我が国では遅れている。そのためそこで本研究では、北海道南部の放牧草地を対象に、デ

ジタル写真測量技術を用い、各年代の空中写真から作成された DSM を用い、草地保全の為の基礎資料となる地形情報を得るとともに、DSM の差分情報による草地地面における地形変化の把握を試みた。さらに、DSM を用いた放牧草地のモニタリングへの適応を評価することを目的とした。

2. 調査地および使用データ

2.1 調査地概要

調査地の概要を Fig. 1 に示す。調査地は北海道渡島支庁北斗市に位置する北斗市営牧場とした。本牧場は昭和51年（1977年）から開始された国営草地開発事業において造成が行われた公共育成牧場である。調査牧場は函館市の北北西約20km に位置し、牧場中央にある標高683m の木地挽山の山頂から裾野までの斜面を切り開いた丘陵性傾斜地にある。北斗市の1999年から2008年までの最近10年間における年平均気温は8.8℃、最高気温は32.5℃、最低気温は-18.1℃で、年平均降水量は約1,167mm であった。また、最深積雪は約40cm であった。

調査地における土壌は、表層には新期の駒ヶ岳火山灰層が堆積し、その下層はローム質の古期火山灰層が見られる。さらにその下層に安山岩礫を含む第三紀層土壌が分布している。草地の主な植生は、イネ科のオーチャードグラス及びチモシー、マメ科のシロクロバーが広範囲に生育している（北海道開発局，1998）。放牧頭数は1990年の1,199頭をピークに、年々低下し2007年は最少の259頭であった。また、本牧場の草地面積は約258.2ha であり、放牧密度は約0.8（頭/ha）であった。放牧種は、肉用牛では褐毛和種、黒毛和種、交雑種、アバディーンアンガス種が、馬では雄馬、一般馬、和種馬が放牧されている。また、一部乳用牛の放牧も行われている。草地造成は昭和51年（1976年）から59年（1984年）にかけて行われた。草地造成工法としては、蹄耕法によるものが101.75ha、耕起法によるものが406.45ha となっている。また、放牧形式は夏山冬里方式の定置放牧で、放牧期間は6月～10月である。

2.2 対象範囲と使用データ

調査地における対象範囲として、放牧草地面を含む枠線内とした（Fig. 1）。対象範囲は東西方向が約1 km、南北方向が約2 km の範囲で、最高標高はテレビ

Fig. 1 調査地概要および調査対象範囲オルソ航空写真 (上) と、DEM (下)

Fig. 2 各年代の DSM 画像 (格子点間隔 5 m)

電波塔の存在する木地挽山山頂の683m, 最低標高は470m となっている。

使用した空中写真の概要を Table 1 に示す。DSM

Table 1 使用した空中写真の概要

撮影年	撮影主体	撮影高度 (m)	縮尺	スキャン 解像度 (μ m)	カメラ	焦点距離 (mm)
1976/5/28	国土地理院	3,600	1/20,000	10	RC-8	152.30
1982/7/3	林野庁	4,800	1/20,000	10	RC-8	209.76
1999/5/31	国土地理院	4,750	1/30,000	10	RC-30	153.75
2002/5/29	地方自治体	4,600	1/20,000	10	RC-30	152.78
2005/6/29	国土地理院	4,600	1/30,000	10	RC-30	152.63
2007/5/21	地方自治体	3,200	1/15,000	10	RC-30	153.65

Fig. 5 対象範囲の空中写真 (左), 1976年と2007年の DSM 差分図 (右)

Fig. 3 DSM 差分図 (A : 対象範囲のオルソ画像 B : 1982年の DSM-1976年の DSM C : 1999年の DSM-1976年の DSM D : 2007年の DSM-1976年の DSM)

の作成には、解像度が $10\mu\text{m}$ のデジタル画像として入手できた1976年、1982年、1999年、2002年、2005年、2007年に撮影された空中写真を用いた。それぞれの空中写真において、使用カメラ名、焦点距離は記載されていたが、その他の内部標定に必要なパラメータは入手できなかった。

3. 調査方法

3.1 数値表層モデルの作成

市販のデジタル写真測量ソフトウェア（図化名人GE：アジア航測）を用い、空中写真のステレオペア画像からDSMの作成を行った。DSM作成の一般的な流れとして、まず、画像座標とカメラ座標を関連付けるための内部標定を行った後、地上基準点（Ground Control Point 以下、GCP）と、オーバーラップする写真間の対応点（Tie Point、以下 TP）を設定し、バンドルブロック調整法による空中三角測量を実行する。これによりカメラ位置や傾き等の外部標定要素が求められ、空中写真の画像座標、3次元地理座標の対応関係が決定される。そして、オーバーラップする画像間でイメージマッチングを行い、同じ地物と判定された画像対応点における3次元地理座標が求められる。最後に、これらの対応点間で不整三角形網（Triangulated Irregular Network：TIN）を生成し、補間処理によってDSMが作成される。

GCPに関しては、現地でキネマティックGPS測量により取得を行った。GCPの設定の足りない地域では、補助的に生成されたオルソフォトを使用し、付近の三等、四等三角点を用い設定を行った。空中写真から作成するDSMの空間解像度は5mおよび高解像度の0.5mとした。

3.2 標定精度およびDSM精度の検証

標定精度は現地にてRTK-GPSにより取得したGCPの座標値と、空中三角測量の結果より求められたGCPの座標値との残差（RMSE）で示した。

また、空中写真から作成されたDSMの精度検証に関しては、地形図等高線より作成した標高データを真値とし、絶対精度の評価を行った。検証点は地物の判読性を検証するため、オルソ画像より道路部、草地、建造物を抽出しそれぞれ30地点により精度評価を行った。地形図からのDEMの作成に関しては従来の1/

25,000地形図からDEMを作成する方法を踏襲し、スキャナで読み込んだ地形図を、輪郭線抽出を行った後、等高線の中心線をベクターデータとして自動的に取得し、指定メッシュ間隔ごとに内挿法により標高値を算出した（大野・田村、2002）。指定メッシュ間隔ならびに空間解像度は、空中写真から作成したDSMと同じ5mとした。検証に使用した地形図は、縮尺が1/5,000、作成時期が国営草地の展開された1976年、作成機関が北海道開発局である。

3.3 地形変化の抽出

各年代の空中写真を用い作成されたDSMから、地形の体積変化量の抽出として、1976年のDSMを基準とし、それ以降の年代（1982年、1999年、2002年、2005年、2007年）とのDSM差分を、ラスタ演算により算出した。本調査では、調査地における造成開始前で、家畜放牧の影響やその後の地形変化の影響のない1976年の空中写真から作成されたDSMを地形変化の基準として用いることとした。

また、より詳細な地形変化を把握するため、0.5mの高解像度DSMを用い、狭小な範囲での変化量の抽出を試みた。調査対象地はFig.1の対象範囲内で対象範囲を樹林地、草地、崩壊地、牛道にカテゴライズし、それぞれの範囲において差分処理を行った。

4. 結果・考察

4.1 標定精度結果

Table 2 にバンドル法による空中三角測量の結果を示す。標定の評価はGCPの座標値との残差である平均二乗誤差（Root Mean Square Error 以下、RMSE）および最大値で示した。

基本図測量作業規定（案）第106条の運用基準に記載されているように、標定制限值は、1/25,000の場合、

Table 2 空中三角測量の結果

撮影年	残差のRMSE			最大値			GCP数
	X(m)	Y(m)	Z(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	
1976年	0.677	0.797	1.341	0.921	1.369	1.889	12
1982年	0.609	0.637	0.952	0.903	0.841	1.117	16
1999年	0.347	0.425	0.559	0.445	0.493	0.719	18
2002年	0.329	0.365	0.498	0.409	0.473	0.891	25
2005年	0.433	0.493	0.669	0.515	0.609	1.029	20
2007年	0.235	0.243	0.329	0.277	0.285	0.508	22

水平7.5m 以内、鉛直2.5m 以内、1/5,000の場合、水平1.5m 以内、鉛直1.0m 以内である。また、基準点残差の制限は、水平、標高とも RMES が対地高度の0.02%、最大値が対地高度の0.04%となっている。

標定検証の結果より、標定精度は X と Y の RMSE が0.3m から1.4m の範囲で、Z の RMSE が0.5m から1.7m の範囲だった。X と Y の残差に比べ、Z の残差が大きくなったが、大きな誤差ではないと言えた。1976年と1982年の標定結果ように撮影年度が古い空中写真ほど RMSE は大きな値を示した。これは、RTK-GPS により取得した GCP が最近のものであることや、空中写真の画像が過去のものほど粗いことが考えられた。また、他の条件が同一であれば、一般に誤差は写真の縮尺の減少もしくは撮影距離の増大に伴って大きくなることが報告されている (林・小口, 2002)。しかし、今回の結果は、作業規定の標定制限を満たすものとなり、良好な結果が得られたと言える。

4.2 DSM 精度検証結果

Table 2 に地形図等高線から読み取った標高値と、空中写真から作成した DSM の標高値との誤差結果を示す。標定誤差の結果より、対象地における標準偏差は、道路部で0.49から1.91の範囲、草地で0.68から1.89の範囲、建物付近で0.42から0.79の範囲だった。1/5,000地形図の標高精度は1m 以内であるため、誤差が1m 以内のものはほぼ無変化と考えると、全体的に見て2007年の DSM はもっとも精度よく、ほぼ無変

化の結果となった。また、1999年もあまり変わらない結果を示した。しかし、1976年の道路部分と2005年の草地部分は他に比べ誤差が大きくなってしまった。1976年の空中写真では、画像から読み取るに、道路が現在の道路に比べ幅が狭く、改修が済んでいないもと考えられた。その結果が誤差として反映されたと判断した。2005年の誤差要因としては、写真撮影時期の違いが影響していると考えられた。植生が繁茂する時期の撮影であることと、放牧家畜の牧草とその他の植生との選り好みがあったためと推察された。栄養価の高いオーチャードグラス、チモシーなどは好んで家畜は摂食を行うが、雑草などは残るため植生の成長程度の違いが誤差に現れたと考えられた。これらは主に、調査地の地形的違いを指摘したものだが、DSM 生成時のエラーも考えられる。特に、設定に用いた GCP や TP の位置ずれによるもの、空中写真自体の品質、画像内における影などを抽出し、誤ったイメージマッチングを行った可能性が考えられた。しかし、今回は地形的な変位を読み取ることに重点を置いているため、写真測量時の誤差は、キネマティック GPS 測量により GCP の設定を行っているため最少であることと仮定した。また、今回計測を行わなかった森林域や沢などの急斜面に関しては、Fig. 4 に示したように平地に比べ多分な誤差が含まれ、十分な DSM 精度が確保出来ないと推察される。そのため、草地や裸地などと比較し体積の増減が大きい。しかし、本調査では、森林域以外において1m 以内の誤差結果を示し、平地や緩傾斜面では比較的良好な結果が得られたと言えた。

Table 3 DSM 標高誤差の結果

検証対象は道路部 (上)、草地 (中)、建物付近 (下)

道路部	撮影年代	1976年	1982年	1999年	2005年	2007年
	最大誤差(m)	−3.12	2.23	2.02	2.85	1.35
	標準偏差(m)	1.91	0.89	0.64	1.11	0.49
(検証点数：30)						
草地	撮影年代	1976年	1982年	1999年	2005年	2007年
	最大誤差(m)	1.22	1.97	3.12	4.21	3.84
	標準偏差(m)	0.68	0.73	1.18	1.89	1.06
(検証点数：30)						
建物付近	撮影年代	1976年	1982年	1999年	2005年	2007年
	最大誤差(m)	−2.18	1.58	1.64	1.97	0.98
	標準偏差(m)	0.77	0.49	0.79	0.67	0.42
(検証点数：30)						

4.3 DSM の作成結果および体積変化

作成された各撮影年の DSM 画像を Fig. 2 に示す。また、1976年の DSM と各年代の DSM との DSM 差分図を Fig. 3 に、地形変化量の推移を Fig. 4 に示す。Fig. 3 には対象範囲のオルソ画像および1982年から1976年を差分したデータと2007年から1976年を差分したデータを示した。また、Fig. 4 は森林部分を含む対象範囲全体の地形変化量の推移および対象範囲で森林部分と判読された部分を地形図 DEM の地盤高から差し引いた森林域を除く地形変化量の場合を示した。

Fig. 4 より対象範囲において DSM 差分から算出された地形変化量は森林域を含む場合と森林域を含まない場合とも増加傾向を示した。しかし、森林域を含む場合に比べ森林域を含まない場合は地形変化量が絶対

Fig. 4 体積変化量の推移

的に小さいことが言えた。すなわち、牧草の生育や斜面崩壊などに対して森林域が体積変化に影響していると考えられた。特に、北東部および南東部における森林域でDSM差分の増加が顕著であり、大部分は樹高の成長があったと推察出来た。空中写真から作成したオルソフォトを用いて調査範囲の土地利用の状況を判読し、作成されたDSMとの整合性を確認したところ、1976年の空中写真から2007年の空中写真まで、画像判読で確認できる程の森林の増加や草地の新規造成、裸地の拡大、崩壊箇所の発生などは見られなかった。このことから、体積の増加は樹木成長によるところが大きいと考えられた。ただし、DSM差分図からもわかるように、森林部分や沢地形では、差分値が多大な値を示した。後述するように作成されたDSMには写真の解像度やGCPの取得状況によるエラーを含んでいる。DSM作成時の整合誤差が森林部分や沢地形で行われることで、樹木成長以外の多分な差分値の抽出が行われたと推察される。

また、1982年から2007年にかけてはDSMの差分の増加傾向が小さいと考えられ、樹高の増加および樹幹面の拡大は、今後、その進行は緩やかになると考えられた。

4.4 放牧草地における地形変化の特徴

Fig. 5には、対象範囲のオルソフォトと0.5m解像度DSMを用い、DSM差分を抽出した差分図を、Fig. 6には、樹林地、草地、崩壊地にカテゴライズした上で、ランダムに抽出した地点における体積変化量とその抽出箇所での傾斜角図を示す。

対象範囲において、樹林地、草地で体積量の増加が、崩壊地で体積量の減少が認められた。樹林地および草地では、樹木、牧草の成長の分だけ体積量の増加に影

Fig. 6 樹林地、草地、崩壊地における単位面積当たりの体積変化量と斜面傾斜角の関係

響したと考えられる。しかし、当然ながら増加程度は樹林地で大きく、草地では小さかった。草地における牧草の生育は、牧草の生育は家畜放牧と季節変動によるところが大きいと考えられる。そのため、経年的な調査を行っていない本調査における草地の体積変化量の増減は、地形変化がない部分における調査結果と言える。牧草地で確認された崩壊地では、空中写真からも分かるほど斜面の崩壊が見られ、結果として、体積の減少が示された。この場合で言う、崩壊地とは、草地面および裸地面における土壌侵食および斜面崩壊のどちらも含み、差別化は行っていない。また、斜面傾斜角を考慮して、それぞれの地点における体積変化を見た場合、樹林地では、傾斜角で、変化量の違いがなく、傾斜角よりも斜面の向きや斜面形状がその成長に影響しているものと考えられた。草地では、傾斜角にかかわらずほぼ変わらない結果となったことから、場所にかかわらず植生の成長があったと考えられた。崩壊地に関しては、傾斜が急であるほど、体積量の減少が確認でき、傾斜角の影響を一番受けていることが示された。

4.5 放牧草地のモニタリングへの適用

森林を含む放牧草地における体積量の変化を見た場合、年代による体積の変化の大きい森林域では、見かけ上、標高値が高く表示される傾向を示した。このことから、草地における地形変化の特徴を考察するには、森林を除いた草地部分を抽出して見る必要があった。そこで、高解像度DSMを用い、草地面での標高値の変化を見た場合、草地と森林との境界部分において、土壌侵食および斜面崩壊が確認できた。これら草地面で

発生した土壤侵食は、下流へと流出し、地形が急激に変化する地点で斜面崩壊を起こす特徴を示した。このことから、放牧草地での侵食の把握には、森林を除外した地形情報の取得と、的確な解像度の選択が必要であると考えられた。

放牧草地の土壤侵食のモニタリングへの適用を考慮し、放牧草地における斜面崩壊や土壤侵食を把握する上で、畑地や裸地などと同様に土壤侵食の形態を考察すると、一般的に土壤侵食の形態には、降雨や表面流出水による水食(リル侵食、ガリ侵食、面状侵食)、斜面崩壊も地形が侵食された結果であり、土壤侵食の一つと言える。また、放牧地では家畜放牧による影響を受け地表面が削られ侵食される場合もある。本調査においては、リル侵食や面状侵食、および、放牧により形成された牛道の影響による地形変化の抽出は行えなかった。しかし、水系ネットワークの発達したガリ侵食ならびに、斜面崩壊については抽出が可能であった。

精度評価の結果、本研究で空中写真より作成された DSM の精度では、標高の変化量が 2 m 以上の侵食および斜面崩壊の抽出は可能であることが示された。本研究では、草地面において抽出された土壤侵食では、2 m 以上の地形変化が見られなかったことから、造成後 30 年以上経過した放牧草地において、大規模な土壤侵食が進行していないことが推察された。ただし、写真判読より、草地面において、侵食溝や牛道による草地の裸地の進行が確認できたことから、これら微細な侵食痕の抽出は困難であると推察された。近年では、航空写真のカメラはデジタル画像が取得できる DMC 航空カメラやセンサとなり、また POS 装置 (GPS と IMU) の導入により、外部標定要素が計測でき、標定基準点、対空標識および空中三角測量が不要となる。今後、益々のデジタル写真測量技術の活用が望まれる。さらに現在では、空中写真よりも情報量が多い、衛星画像などのリモートセンシングデータを用い、裸地面の抽出と地形解析を行った研究例(大嶋ら, 1986; 及川・飯倉, 2007)が見られる。草地管理を考えた上で、高解像度の画像の整備やマルチスペクトル観測の発展は、放牧草地モニタリングの発展に寄与すると考えられる。

以上の結果を踏まえ、放牧草地のモニタリングへの適応を考えた場合、地形を広域に把握でき、年代ごとの地形変化を定量的に把握できることが示された。また、草地における植生の成長を地形的に把握することの可能性を示した。今後、写真測量技術は、草地の保

全、維持のためのモニタリングの手法として活用できると考えられる。

5. おわりに

本研究では、デジタル写真測量技術を用い、年代別の空中写真から DSM の作成を行い、放牧草地における土壤侵食および斜面崩壊の把握を試みた。また、DSM を用いた放牧草地のモニタリングへの適応の評価を行った。まず、DSM と地形図等高線から作成された DEM との精度評価の結果では、各年代の DSM とも概ね ± 1 m 以内の良好な精度が得られた。しかし、ステレオマッチングの際に誤計測を起こしやすい地形では平坦な地形に比べ精度低下が見られた。年代別の DSM 差分処理の結果として、DSM の変化の把握を、森林域を含む調査範囲全体で行った場合では、1976 年に比べ体積の増加が確認できた。これは、森林域を含むことで、樹木の成長や樹冠面の拡大などによる標高値の増加があったためと推察された。対象を絞った地形変化を見た場合、樹林地、草地面では、樹木、牧草の成長による体積量の増加が、斜面の崩壊が見られた部分では、体積量の減少が確認できた。また、草地部分では、造成初期から体積変化量は大きな変化は見られなかった。

以上のように本研究では、航空写真を用いて作成された DSM から地形変化量を抽出し、広域の放牧草地における土壤侵食の把握を試みた。

謝 辞

現地調査では北斗市営牧場の管理者に、調査と実験では北里大学獣医畜産学部専攻生の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

また、本研究は、私立大学教育研究高度化推進特別研究ならびに(財)日本草地畜産種子協会からの補助を受けて実施したものである。

(受付日 2009.7.21, 受理日 2010.7.9)

参考文献

石田良作, 西村 格, 須山哲男, 1980. 草地の造成と開発計画に関する研究 V. 傾斜草地における土壤侵食の 2・3 の問題点, 草地試験場研究報告, 17, pp. 1-10.

- 井戸忠幸, 阿部篤郎, 豊田広三, 1978. 山地傾斜地の草地保全の実態調査, 草地試験場研究報告, 13, pp. 130-136.
- 岩崎純子, 神谷 泉, 山岸宏光, 2009. LiDAR DEMを用いた表層崩壊のアセスメントに適する勾配と凹凸度の計算範囲の推定, 地形, 30(1), pp.15-27.
- 及川 宗, 飯倉善和, 2007. 衛星画像を用いた白神山地における山崩れの地形的要因に関する研究, 白神研究, 4, pp.15-21.
- 大嶋太市, 力丸 厚, 加藤洋一, 中村正治, 1986. 数値地形データおよびリモートセンシングデータの合成による山岳崩壊発生危険地区の推定について, 法政大学工学部研究集報, 22, pp.179-186.
- 大野裕幸, 田村栄一, 2002. 2万5千分1地形図ベクトルデータによるDEM作成方法について, 国土地理院時報, 99, pp.33-38.
- 加甲艶照, 小田日出夫, 豊田広三, 1977. 傾斜草地の土壤保全に関する研究 III. 傾斜草地の造成, 定着過程における土壤侵食, 草地試験場研究報告, 10, pp.135-145.
- 加納春平, 山本 博, 斎藤吉満, 木戸恭子, 2004. 山地傾斜草地の特性と持続的生産, 日草誌, 50(1), pp. 83-89.
- 佐藤 浩, 2004. 火山活動終了後の雲仙普賢岳・溶岩ドーム周辺の地形変化, 地形, 25(1), pp. 1-22.
- 高木 東, 矢橋晨吾, 中野政詩, 1978. 浪岡東部丘陵地における土壤侵食-斜面の侵食に関する研究 (I)-, 農土論集, 76, pp.31-37.
- 高山茂美(著), 1974. 河川地形, 共立出版, 東京, pp. 22-74.
- 竹内美次, 1996. 北上山地の放牧草地における土壤物理性および流出土砂量について, 日本緑化工学会誌, 22(1), pp. 7-14.
- 田口 仁, 古川邦明, 遠藤貴宏, 沢田治雄, 安岡善文, 2009. 多時期の空中写真から作成した Digital Canopy Model による森林キャノピーのモニタリング, 写真測量とリモートセンシング, 48(1), pp. 4-14.
- 中山大地, 小寺浩二, 2000. 地形学・水文学における地理情報の処理手法について-数値地形モデルを用いた流域地形計測の試み-, 法政大学計算科学研究センター研究報告, 13, pp. 1-6.
- 永井政雄, 加甲艶照, 豊田広三, 1973. 傾斜草地の土壤保全に関する研究 I. 山地傾斜地土壌の特性について, 草地試験場研究報告, 3, pp.118-129.
- 長沢徹明, 梅田安治, 1986. 山林傾斜地における草地造成と保全-傾斜草地に関する農業土木的研究 (II)-, 北海道大学農学部邦文紀要, 15(2), pp.159-168.
- 日本写真測量学会編, 1989. 解析写真測量, 日本写真測量学会, 東京, 199pp.
- 長谷川裕之, 佐藤 浩, 岩崎純子, 吉田幸子, 2004. 三宅島・陥没カルデラと雲仙普賢岳・水無川流域における地形変化について, 国土地理院時報, 105, pp. 83-95.
- 林 舟, 小口 高, 2002. 地形学における写真測量法の応用-欧米の事例を中心に-, 地形雑誌, 111(1), pp. 1-15.
- 北海道開発局, 東北農業試験場, 北海道農業試験場, 1998. 草地開発技術調査・低コスト草地造成工法確立調査報告書-マクロシードペレットによる荒廃草地の修復技術-, 127pp.
- 満鉄調査局, 1943. 土壤侵食防止の研究, 博文館, 東京, pp.558.
- 三浦弘之, 翠川三郎, 井上聡史, 2005. 高解像度数値標高モデルを用いた都市域での急傾斜崩壊危険箇所の抽出手法, 地域安全学会論文集, 7, pp.299-306.
- 三原真智人, 上野貴司, 1999. 畑地における土壤流亡と窒素およびリン成分の表面流出, 農土論集, 200, pp.171-178.
- 森脇 寛, 1983. 降雨事件による畑地模型の表面流出について, 国立防災科学技術センター研究報告, 30, pp.65-82.
- 山本 博, 2004. 草地の土地保全機能とその活用・回復, 日草誌, 50(2), pp.227-232.
- 力丸 厚, 2005. 新潟県中越地震における写真測量・リモートセンシング分野の取り組み, 写真測量とリモートセンシング, 44(1), pp.44.
- 渡辺 宏, 1993. 最新森林航測テキストブック, 日本林業技術協会, 東京, 263pp.
- Hudson, N., 1971. Soil Conservation. BT Batsford Limited, London, 301pp.
- Holy, M. (著), 岡村俊一, 春山元寿 (訳). 1983. 侵食-理論と環境対策-, 森北出版会, 東京, 226pp.
- Wells, R.R., Bennett, S.J. and Alonso, C.V. 2009. Morphodynamics of headcut development and soil erosion in upland concentrated flows, Soil Sci. Soc. Am J., 73(2), pp.521-530.