

足尾荒廃地における航空レーザ測量を用いた土砂流出調査

関東森林管理局 計画保全部 治山課 田中 裕貴
(元 日光森林管理署) 諸星 智之

1. はじめに

国内最大規模の銅の生産を誇った栃木県足尾地域は、燃料木や坑木の採取、山火事による森林の消失、銅の精錬に伴う煙害により緑化が困難な荒廃地が広がっていました。現在、長きにわたる緑化対策と自然の回復力により、広い範囲において緑が蘇っています（写真-1）。このような足尾荒廃地の特性を踏まえ、関東森林管理局では、治山事業の役割や自然環境への理解を深めることを目的に、下流への影響が心配されず治山事業の施工を要しない荒廃地の一部を保存する「観測監視地区」を2003年に設定しました。2023年には「観測監視地区」を設定して20年が経過します。荒廃地を保存していることによる土砂流出等の影響を調査し、「観測監視地区」の今後の在り方を検討する必要があります。調査にはLPデータを使用し、「観測監視地区」における荒廃地の残存傾向の把握、2時期のLPデータの差分解析による顕著な土砂移動箇所の抽出及び「観測監視地区」からの土砂流出量の試算を行いました。



写真-1 松木沢の緑化状況（左：1950年頃 右：2023年）

2. 調査対象地と使用データ等

(1) 調査対象地

「観測監視地区」は、栃木県日光市足尾町の松木沢の右岸に位置します（図-1、写真-2）。面積は491.3haであり、うち約10haは1987年～1992年に航空実播工や植栽工等を施工しています。地区の設定後は治山事業を実施せず、荒廃地の状況を観測・監視しています。足尾雨量観測所の雨量データ（1991-2020年）より、年平均降水量は1,807.6mmであり、令和元年東日本台風（台風第19号）の際には日最大雨量424mmを観測しました。

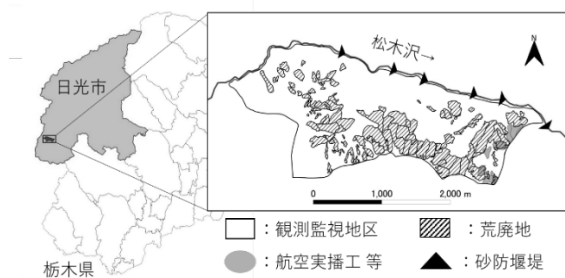


図-2 調査対象地（湖南国有林263林班内） 写真-2 「観測監視地区」の全景（2008年）

(2) 使用データ・ソフト

本調査に使用したデータは、「平成19年度三川支流地区松木沢観測監視地区地形測量業務」及び、「令和3年度足尾地区航空レーザ測量業務（R2三次補正）」により取得した数値標高モデル（Digital Elevation Model；以下DEM_2007, DEM_2021）です。データ解析には、オープンソースの地理情報システムであるQGIS（3.22ver）を使用しました。

3. 荒廃地の地形的な残存傾向

本調査では、荒廃地を「裸地を含む崩壊（跡）地」と定義し、2021年に取得した航空写真と微地形図により、植生の有無や滑落崖をもとに判読しました（図-1）。荒廃地の合計面積は136.3ha、全体の荒廃率（「観測監視地区」に占める割合）は27.7%です。

(1) 方法

0.5mメッシュのDEM_2021より標高図・傾斜図・斜面方位図を作成しました。また、尾根谷を示す指標であるTPI（Topographic Position Index）図を、DEM_2021のメッシュサイズを5mにリサイズし、尾根谷の大地形を表現して作成しました。各地形においてカテゴリごとの荒廃率を求めることにより、荒廃地の地形的な残存傾向を把握しました（図-2）。

(2) 結果・考察

ア 標高（100mごと10クラス）

「観測監視地区」の平均標高は1,306m、荒廃地の平均標高は1,378mです。荒廃率は1,401~1,500mで54.8%と最も高く、次いで1,501~1,600mで47.9%となっており、尾根付近に荒廃地の残存傾向が見られました。尾根付近は、長年の表土流出により風化した砂礫に覆われ、土壌は乾燥し痩せています。加えて、更新源となる母樹もなく、植生の侵入は遠方で散布される風散布種子によるしかありません。風を遮るものもないため、冬季の寒風害も荒廃地の残存に影響すると考えられます。

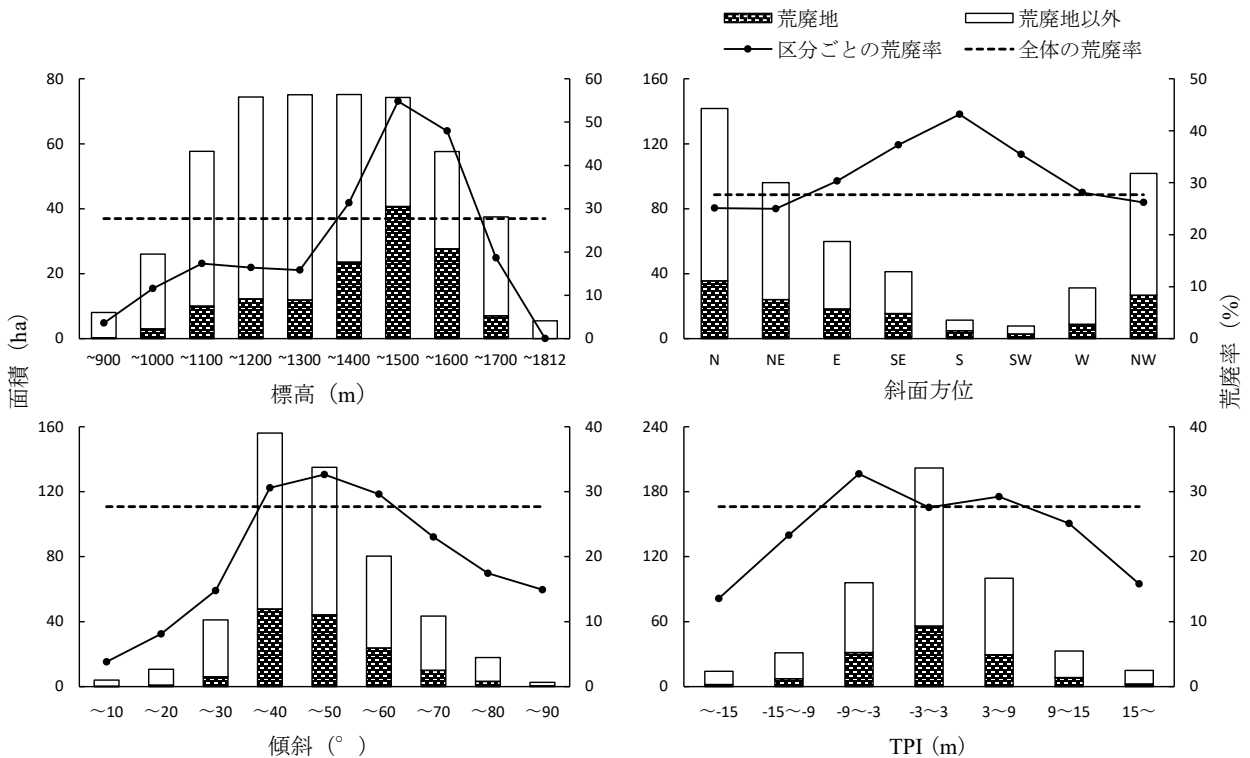


図-2 各地形における荒廃地の残存傾向

イ 傾斜（10° ごと 9 クラス）

「観測監視地区」の平均傾斜は 43.9°，荒廃地の平均傾斜は 44.5° です。荒廃率は 41～50° で 32.6%と最も高く，31～60° で全体の荒廃率 27.7%を超えています。急斜面で表土が移動しやすく，侵食の営力が大きくなるためだと考えられます。一方，61～90° で見られる荒廃率の減少は，このカテゴリに基岩が露出した急崖地が分布するためと考えられます。

ウ 斜面方位（8 方位 8 クラス）

「観測監視地区」の全体的な斜面方位は北向きであり，谷地形に南斜面が分布しています。荒廃率は南斜面で 43.1%と最も高く，次いで南東，南西斜面が全体の荒廃率を上回っています。谷地形が荒廃地の残存に影響している可能性がある一方，斜面方位は，日射量を間接的に表す地形要素です。足尾のヘリコプター緑化に際しては，夏季の日射で高温となった地表面から実生を守る必要性が述べられています（牧野，1966）。陽光は植物の生育に不可欠ですが，日射を遮るものがない荒廃地においては，地表面の高温化や土壌水分の条件悪化により，初期植生の侵入に負に影響すると考えられます。

エ TPI（6 m ごと 7 クラス）

TPI という地形指標は，周辺セルと中心セルとの位置関係を示しており，正の値が尾根，負の値が谷です。他の地形要素と比較して傾向が明瞭ではありませんが，-9～-3 m の比較的浅い谷において，荒廃率が 32.7%と最も高くなっています。これは源頭部となる 0～1 次谷に地表水が集まり，地表面を流下することで表土が侵食されるためと考えられます。

ア～エを総合すると，「観測監視地区」の荒廃地は，痩せた土壌で寒風害の影響が強い尾根付近，31°～60° の急傾斜地，地表面が高温となる南斜面，地表面流の発生する 0～1 次谷，といった侵食の営力が大きく，植生の侵入が困難な地形に残存傾向が見られました。現在ある荒廃地の姿は，植生回復と侵食のバランスの中で形成されており，今後も維持される可能性が高いと考えられます。

4. 「観測監視地区」の土砂流出に関する試算

（1） 斜面侵食に関する先行調査

関東森林管理局では，「観測監視地区」における斜面の被覆状態の違いによる地表面の侵食調査を 2005 年に実施しました。「観測監視地区」の尾根付近に 6 か所の観測施設を設け，各施設のトレンチに溜まった土砂を収集しました。収集した土砂をばねはかりで計測し，年侵食深を換算しました。計 3 回の計測による平均結果を表-1 に示し，後述の試算に使用します。

表-1 年侵食重量（g/m²/年）と年侵食深（mm/年）

観測地	設置位置	植生被覆	傾斜 (°)	年侵食重量 (g/m ² /年)	年侵食深 (mm/年)
No. 1	非施工地	裸地	31	280	0.26
No. 2	非施工地	裸地	29	861	0.80
No. 3	施工地	良好	31	236	0.22
No. 4	施工地	不良	32	-	-
No. 5	施工地	不良	31	207	0.19
No. 6	施工地	良好	30	201	0.19

注 1) No. 4 観測地は，施設の設置に使用した土のうの一部が破壊され土砂流出したためデータを控除

注 2) 換算係数は現場密度試験の結果から単位体積重量 1.07 cm³/g を適用

(2) 差分解析の方法

「観測監視地区」の土砂移動を把握するために、DEM_2007とDEM_2021を差分解析しました。2時期のDEMには東日本大震災等を原因とするズレがあり、松木沢の砂防堰堤を基準として位置を補正しました。差分処理により得た標高変化箇所について、航空レーザ測定の精度と航空写真による判読を考慮し、平川(2006)や松岡ら(2009)による先行研究を参考に標高変化が「1m以上かつ5m²以上」の顕著な土砂移動箇所を抽出しました。その後、2つのDEMの地表面処理の違いにより発生したと考えられる急崖地における増加・減少について、航空写真及び等高線を参考に土砂移動ではないと判読して除去しました。

(3) 差分解析の結果・考察

14年間の標高変化量が大きかった箇所について、減少(Decrease)を上位からD1, D2, D3, 増加(Increase)を上位からI1, I2とし、拡大表示します(写真-3)。図中の青色が地形の侵食、赤色が土砂の堆積を表しています。2007年時点ですでに崩壊していた箇所の拡大崩壊(D1, D2)や、谷壁の脚部を侵食することによる谷壁の崩壊(D3)が顕著です。これら土砂発生源の斜面下部(I1)や緩勾配の溪床、谷の出口付近に土砂の堆積(I2)があります。荒廃地(図-1)と侵食箇所の関係については、71.5%の侵食箇所が荒廃地に位置しています。残りの約3割は、荒廃地周辺の侵食や溪谷に位置する谷壁の崩壊です。顕著な土砂移動箇所の合計面積は5.5ha、「観測監視地区」に占める割合は1.1%です。2007年から2021年にかけて「観測監視地区」から流出した土砂は、図中青色の侵食により土砂が発生し、図中赤色の堆積を上回る量が流出していると考えられます。したがって、「観測監視地区」外への土砂流出量を、侵食量から地区内に留まる堆積量を減じて算出しました。その結果、年間3,124m³の土砂が「観測監視地区」外へ流出しており、顕著な土砂移動箇所を1つの崩壊地(5.5ha)と捉えたときの年侵食深は56.6mmです(表-2)。

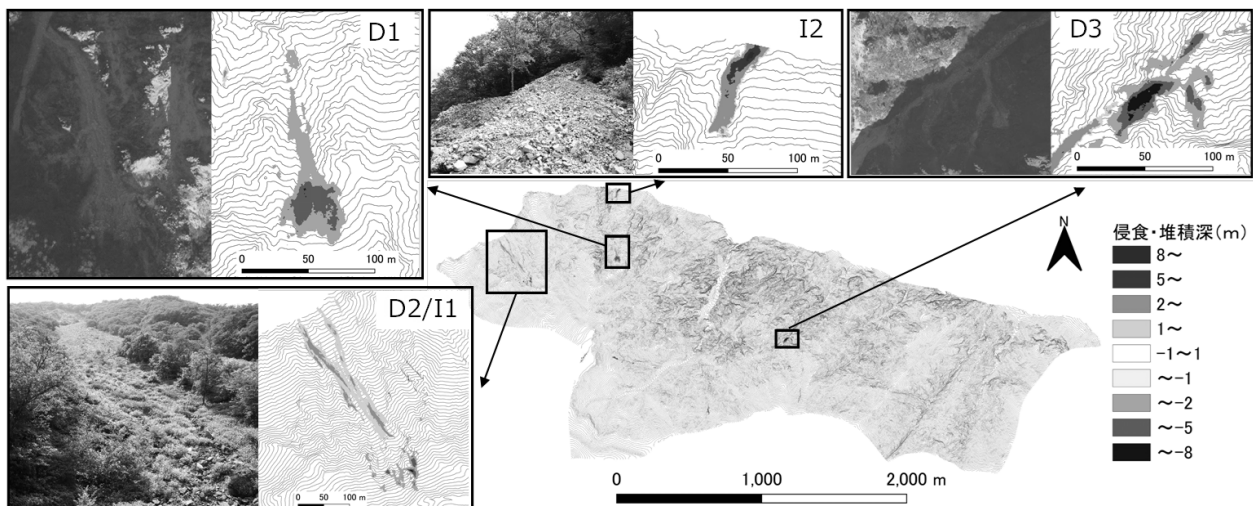


写真-3 差分解析の結果(写真は2021年10月航空写真及び2022年8月調査写真)

(4) 「観測監視地区」の土砂流出に関する試算

差分解析の結果を踏まえ、「観測監視地区」全体の土砂流出に関する試算を行いました。地区全体の試算には、差分解析で抽出されなかった箇所(485.8ha)の侵食を考慮する必要があります。そこで4.(1)斜面侵食に関する先行調査より、差分解析の結果とオーバーラップしなかった荒廃地に年侵食深0.53mm(No.1とNo.2の平均値)、森林・草地等に年侵食深0.21mm(No.3とNo.6の平均値)を適用して表-2のように計算しました。その結果、「観測監視地区」全体の年土砂流出量が4,552m³、年

侵食深が 0.93mm となりました。一般的な地被別平均年侵食深は、荒廃地 $10^2 \sim 10^1$ mm, 裸地 $10^1 \sim 10^0$ mm, 農耕地 $10^0 \sim 10^{-1}$ mm, 草地・林地 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ mm と言われています (川口, 2002)。試算結果の年侵食深 0.93mm を評価すると、農耕地と同程度の侵食です。つまり、2007 年から 2021 年の 14 年間においては、下流域へ大きな影響を与える土砂流出はなかったと考えられます。

表-2 「観測監視地区」全体からの土砂流出の試算

	面積 (ha)	年侵食深の適用 (mm/年)	年侵食量 (m ³ /年)	年侵食深 (mm/年)
観測監視地区	491.26	—	4552.07	0.93
差分解析結果	5.52	56.59	3123.89	—
荒廃地	133.05	0.53	705.17	—
森林・草地等	352.69	0.21	723.01	—

5. まとめ

「観測監視地区」の荒廃地は、侵食の営力が大きく植生の侵入が困難な地形に残存傾向が見られ、差分解析により局所的に拡大崩壊等を観測しました。「観測監視地区」の荒廃地を自然復旧に任せた場合、森林へと遷移するには長い年月が必要となり、荒廃地は保たれると考えられます。治山の基本理念に立脚するならば、治山事業を実施し荒廃地を森林へと早期復旧するべきという意見もあるかもしれません。

一方で、「観測監視地区」においては、荒廃地を保存する意義があります。足尾荒廃地は、公害による森林荒廃という歴史的背景を踏まえ、治山の学習や公害の負の歴史を伝える環境教育の貴重なフィールドとなっています。日光森林管理署では、JICA を通じた海外研修等を実施しており、「観測監視地区」は公害による森林の荒廃とそこからの復旧を視覚的に伝える役割を担っています。

「観測監視地区」は、令和元年東日本台風 (台風第 19 号) の激甚な降雨を経験しましたが、試算した年侵食深は農耕地と同程度でした。また、下流域への土砂流出に直結する松木沢沿いの崖錐性堆積物には 2 次林が成立し (図-1), 土砂流出防備機能等を発揮していると考えられました。加えて、松木沢には複数の砂防堰堤が設置されていることも勘案すると、「観測監視地区」を継続することの下流域への懸念は少ないと判断できます。今回の調査結果と「観測監視地区」の意義を踏まえ、今後も災害の発生を注視し、景観の変化等も見据えた「観測監視地区」の活用を検討しつつ、「観測監視地区」を継続していくべきと考えます。

参考文献

砂防学会誌, Vol. 58, No. 6, p. 18-22, 2006: 航空レーザ測量による地形変化把握のための標高差分値の最適化, 平川泰之

水利科学, : 山地からの土砂流出対策としての森林・治山工を考える, 川口武雄 2002 年 45 巻, 6 号, p. 52-68

「山脈」, Vol. 17, No. 2, (その 1) 別刷, p3-14, 「山脈」, Vol. 17, No. 4, (その 2) 別刷, p3-14, 図説足尾のヘリコプター緑化工《1965 年の施行からその秋の生育まで》, 牧野道幸, 1966 年, 前橋営林局治山課

砂防学会誌, Vol. 62, No. 1, p. 60-65, 2009: 報文「LiDAR データの差分処理による流域土砂動態把握の試み」, 松岡暁・山越隆雄・田村圭司・長井義樹・丸山準・小竹利明・小川紀一郎・田方智