

【論文】

一般化線形モデルを用いた北上高地における風食荒廃の解析

飯倉善和, 角田里美, 横山隆三

Analysis of wind erosion in the Kitakami Highlands by generalized linear models

Yoshikazu IIKURA, Satomi KAKUTA and Ryuzo YOKOYAMA

Abstract: Wind erosion observed in the Kitakami Highlands has been caused by severe weather condition and deforestation. Though strong west wind in winter and solifluction in spring are known as the major physical factors of erosion, it is difficult to evaluate their effects quantitatively. This paper proposes to use a directional openness index and an averaged direct solar irradiation in addition to elevation to explain probabilities of wind erosion occurrence, and demonstrates the dominance of these factors over simple topographical factors such as slope and aspect. Generalized linear models with cross effects were applied to a dataset derived from digital elevation models and vegetation maps. The effect of deforestation on wind erosion was also analysed.

Keywords: 数値標高モデル (digital elevation model), 一般化線形モデル (generalized linear model), 交互作用 (cross effects), 直達日射量 (direct solar irradiance), 開放度 (openness index)

1. はじめに

北上高地 (図1) の開発の歴史は古く、江戸時代には山頂付近まで牛馬の放牧のための森林の伐採や火入れがあったことが記録されている (岩田, 1971)。戦後は経済復興政策による山地開発が進められ、牛の放牧地などとして利用され始めた。しかし、それらの地域の一部では、牧草が定着せず、荒廃地と呼ばれる裸地が広がる現象が発生した。

荒廃地は北上高地の北部を中心に広く分布している。昭和52年の岩手県森林保全課 (1977) の主に航空写真の判読による調査では、875ヶ所、面積340haの風食荒廃地が確認された。これまで、荒廃地の発生には人為的な要因 (森林伐採) に加えて冬の強い寒気と強風などの厳しい気象条件が関係す

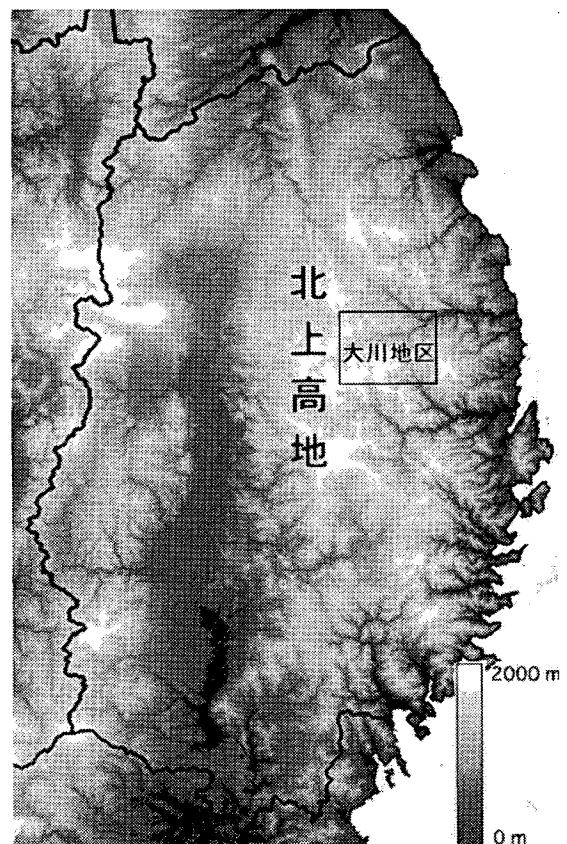


図1 岩手県の数値標高モデルと北上高地

飯倉：〒020-0066 盛岡市上田4-3-5
岩手大学工学部情報工学科
Dept. Computer and Information Science, Faculty of
Engineering, Iwate University
Tel. 019-621-6481
e-mail. iikura@cis.iwate-u.ac.jp

ること、また自然の条件では回復が困難であることが知られている（小疇，1991）。このような荒廃地発生の定量的な解析および予測を行う方法として、そのメカニズムから類推される環境要因を説明変数、荒廃率を目的変数とした統計的なモデルを用いることは、現実的かつ十分説明力のある方法と考えられる。これまで、標高、斜度、傾斜方位など主に地形的な要因を説明変数とした統計モデル（村井・北田，1972；高橋・岸原，1976；角田ら，1997）が提案されている。

本論文では、風食荒廃の環境要因として従来のモデルでは取り上げられてこなかった西向き開放度と春における日射量を取り上げる。第2節で荒廃発生のメカニズムとその統計的なモデル化（一般化線形モデル）について説明する。第3節では風食荒廃地の空間分布の調査結果、国土地理院発行の数値標高モデル、および環境庁の現存植生図を用いて幾何的に整合性のとれた小領域（30m 平方）単位の環境要因に関するデータセットを作成する。第4節で、このデータセットに一般化線形モデル（ロジスティック回帰）を適用し、単純な地形的要因と開放度や日射量を説明変数として使った場合との適合度を比較する。また、森林の防風効果についても検討を加える。

2. 風食荒廃要因の定量的な解析方法

2.1. 荒廃地発生のメカニズム

荒廃地の発生には、人為的な要因に加えていわゆる周氷河作用や風食が関わっている（小疇・澤口，1988）。すなわち、森林が伐採された斜面は風衝地となり、強風（偏西風）によって雪がとばされる。そのため、直接寒気にさらされた地面は激しく凍結する。凍結した地面の下には霜柱の層ができ、これが土を持ち上げるため植物は根付かない。また、晩秋や春には凍結融解が短い周期でくり返され、礫が地表面にあらわれる。不安定となった土壌は雨水や風の侵食（風食）により下方へ流されることになる。

2.2. これまでの定量的な解析結果

風食荒廃地が集中している大川地区（図1，図2）

については、すでに現地調査に基づく詳細な解析が行われ、以下の点が指摘されている（岩手県治山林道協会，1978）。この地区の山腹斜面の中下部はブナ・ミズナラの天然林から構成され、山腹上部および頂部にはダケカンバなどを主とする広葉樹疎林とノイバラ、ミネヤナギなどの低木を点在させるシバ草原となっている。荒廃地は、斜面の上部のシバ草原で斜度が20度以上、西から南西の斜面で、標高900～1200mの間に多く発生している。図2に大川地区の荒廃地（3.1節を参照）と大分類した植生（3.3節を参照）の空間分布を示す。

村井・北田（1972）は、大川地区を対象に数量化理論を用いた荒廃危険度の定量的な解析を行った。この解析は、荒廃地の面積率を、開放度、標高、斜度、傾斜方位、斜面上の位置、森林粗密度から推定するものであり、必要なデータは航空写真や地形図などを300m四方のメッシュに細分して読み取っている。荒廃要因としては、森林粗密度と開放度の重要性が示された。すなわち、林被の乏しい場所（大部分は自然草地）ほど、また南西の地区よりも高度が高くなっている場所ほど荒廃率が高くなる傾向が示された。高橋・岸原（1976）も同様な解析を北上高地全域に適用している。環境条件として温量指数などの気象要因を加えているが、村井らとほぼ同様な結果を得ている。角田ら（1997）は数値標高モデルと衛星画像を用いて要因間の交互作用を含めた線形モデルによる予備的な解析を報告している。

本論文では、物理的な因果関係の把握のための方

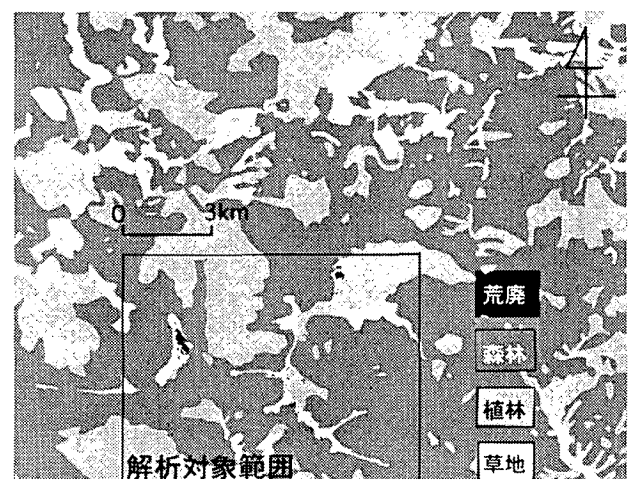


図2 大川地区の植生図と荒廃地の分布

法論を確立するという立場からデータセットの吟味と、適切な統計モデルの選択を検討する。

2.3. 解析の基本方針

風食荒廃のような空間的な問題を統計的に取り扱う場合、標本の抽出をどのようなスケール（単位）で行うかがまず問題となる。写真や地図から人間が変数を読み取る場合には、スケールを大きくとった方がデータ量が少ないという意味では都合がよい。しかし、スケールを大きくすると、変数の変動が大きくなり、平均値（連続型変数）や最頻値（離散型変数）によるデータの集約が物理的に意味のないものになる。村井・北田（1972）が採用した300mの空間分解能は、この意味で風食荒廃の物理的な因果関係に踏み込んだ解析には不十分と考えられる。

近年、数値標高モデルや衛星画像など精密な地理的情報（50m程度の空間分解能）がデジタル化された形で入手できるようになった。これらのスケールでは、風食荒廃率が0と1に偏るため線形モデルによる解析は馴染まない。しかし、これを2項分布の1回の試行における実現値と考えれば、いわゆるロジスティック回帰が自然に適用できる。本論では数値標高モデルの空間分解能の制約などから30m四方の小領域を単位とする標本を作成する。なお、ロジスティック回帰は後述（2.4節）するように一般化線形モデルというより広い枠組みで考えることができる（McCullagh and Nelder, 1989）。

次に対象とする母集団を設定する。母集団の設定は環境要因の荒廃率におよぼす影響が顕著にあらわれるように設定すべきである。したがって、荒廃地がほとんど見られない標高800m以下の地点を対象にすることはあまり意味がない。また、荒廃地の発生はほとんどの場合、森林伐採（人為的影響）が引き金になるため、伐採されていない森林は荒廃に関して環境要因との因果関係を持たない。すなわち、森林は対象からはずされるべきである。この意味では、大きな矩形領域における荒廃地の単純な面積率を荒廃率と考えるのは妥当ではない。

どのような環境要因を説明変数として取り上げるかは、専門的な検討と定量的な検証を必要とする問題である。本論文では、検証のための方法論を確立

するという立場から、発生のメカニズムを類型化して、(1)冬期の強風によって雪がとばされる現象に影響を与える因子A、(2)春の融解現象に影響を与える因子B、(3)冬期の土壌の凍結の強さに影響を与える因子Cを考えることにした。

冬期に西風が卓越していることを考えれば、因子Aは対象地点の西側に風を遮るものがあるかがポイントになる。すなわち西側の地形的な開放度と森林の存否である。これらのデータはDEMと植生図から作成することができる。

従来、因子Bとしては傾斜角や傾斜方位など複数の間接的な要因が考えられて来た。しかし、要因の数を増やすことは、統計モデルの頑健性を損なうことになり好ましくない。本論では、より直接的な因果関係をもつ直達日射量を統計モデルに取り入れることの妥当性を傾斜角や傾斜方位を取り入れた統計モデルと定量的に比較することにより検証する。直達日射量は、数値標高モデルと太陽の位置（高度と方位）から計算ができる。なお、春よりも晩秋における凍結融解が斜面物質の移動に寄与しているという指摘（澤口,1987）があるが、ここでは取り上げない。

気温の遞減率から明らかなように、標高は因子Cとして欠かせないものである。高橋・岸原（1976）らに取り上げた温量指数には、標高の他に緯度や陸度などが考慮されている。しかし、本論文で扱う領域は狭いため、標高以外の影響は小さいと考えた。

なお、村井・北田（1972）らに取り上げた森林粗密度は、メッシュ内の森林の割合であるが、目的変数とした荒廃の面積率と自明な関係をもつため、説明変数としては適当ではない。

2.4. 一般化線形モデル

線形モデル（Searle, 1971）は、目的変数が数値変量で誤差が正規分布に従う場合に有効な方法である。説明変数は数値変量でも類別変量でもかまわないが、偏回帰係数や水準ごとの母数は最小自乗法を用いて推定されるのが一般的である。

一般化線形モデル（McCullagh and Nelder, 1989）では、線形結合により集約された説明変数と目的変数との非線形な関係と誤差の非正規性がモデル化で

きる。また、母数の推定には最尤法が用いられる。

対象地点の荒廃発生の期待確率 q が、環境条件 x の線形結合 $\eta = \beta \cdot x$ の関数 $\Phi(\eta)$ として表されるとする。この関数は逆リンク関数と呼ばれ、荒廃発生のような 2 値の目的変数に対しては、次のロジスティック曲線を設定するのが自然である (竹内, 1989)。

$$\Phi(\eta) = \frac{e^\eta}{1 + e^\eta} \quad (1)$$

荒廃が環境条件 x で発生した時 ($y = 1$)、その尤度は q となり、発生しなかった場合 ($y = 0$) は $1 - q$ となる。したがって、複数の標本に対する対数尤度 L は次のようにかける。

$$L = \sum_{i=1}^n \log (y_i \Phi(\eta_i) + (1 - y_i)(1 - \Phi(\eta_i))) \quad (2)$$

母数はこれを最大にするように決定する。一般化線形モデルでは尤離度 $D = -2L$ が適合性の評価尺度に用いられる。ちなみに、尤離度は通常の線形モデルにおける自乗誤差の一般化になっている。また、期待確率 $\Phi(\eta)$ を標本における平均荒廃発生率 (一定) とした場合の尤離度を全尤離度という。

3. 基本データの整備と標本の抽出

空間的なデータを解析するためには、すべてのデータを統一的な地図座標系のもとで、正確に位置合わせを行う必要がある。本節では、以下に示すデータを空間分解能 30m の UTM 座標系のラスターデータに変換した上で、標高 800m 以上の対象地域の画素毎の属性からなるデータセットを作成する。

3.1. 風食荒廃地の空間分布

これまでの各種調査の中で風食荒廃地を地図上に示したものには、水利科学研究所 (1980) と岩手県治山林道協会 (1978) がある。前者は北上高地全域の主要な荒廃地を 2 万 5 千分の 1 の地形図上に描いている。我々はこの報告書のコピーを入手した。しかし、デジタル化する際の正確な制御点を選択できないなどの問題があった。

後者は、大川地区内の限定された領域における風

食荒廃地を網羅的に 5 千分の 1 の地形図上に描いている。昭和 40 年代の航空写真と現地調査をもとに作成されたものであり、信頼性はかなり高いと考えられる。我々はこのオリジナル版を入手することができた。

荒廃地の空間分布については、衛星画像から抽出することも考えられる (角田ほか, 1997)。しかし、十分な空間分解能を持つランドサット TM データが利用できるのは昭和 50 年代後半になってからであり、その頃は一部の地域で復旧工事が始まっていた。また、衛星画像から荒廃地を抽出するには、大気地形効果の補正 (飯倉・横山, 1999) や道路や森林伐採直後の裸地などの除去などを正確に行う必要がある。

以上から荒廃地の環境特性を本来の姿でできるだけ正確に検討するため、本論文では岩手県治山林道協会の報告書を用いることとした。添付された地形図を正確な制御点のもとでデジタルタイザを用いて、ベクターデータとして計算機に入力し、さらにラスターライズにより 30m の分解能の 2 値画像を作成した (図 2 を参照)。

3.2. デジタル標高モデル

国土地理院から、日本全国をカバーした DEM (FD 版) が出版されている。これは、投影法が等緯度経度、メッシュサイズが約 50m、標高の分解能が 0.1m のラスターデータである。われわれは図 1 に示すような岩手県全域の DEM を入手し、これを地形図や衛星画像との整合性の高い UTM 座標系の 30m メッシュに変換した (飯倉・横山, 1998)。

(1) 幾何変換

まず変換後のメッシュ点の UTM 座標の緯度・経度を求める。次に求めた緯度・経度の近傍メッシュ 4 点の標高値から対象地点の標高を共一次内挿法で求める。内挿法としては、3 次畳み込み法も検討したが、鮮鋭化や振動現象のため DEM の内挿には適当ではないと考えられた。

(2) 斜度と傾斜方位の計算

注目するメッシュとその周囲 8 点の計 9 点の標高値を用いた最小自乗法により斜面を次の式で平面近似した。

$$z = ax + by + c \quad (3)$$

平面の法線ベクトル $(a, b, -1)$ から斜度 θ と傾斜方位 ϕ は以下のように求められる。

$$\theta = \tan^{-1}(a^2 + b^2) \quad (4)$$

$$\phi = \cos^{-1}(-b/(a^2 + b^2)) \quad (5)$$

(3) 開放度

対象地点から指定された方位を見上げたとき、空の見える角度が開放度 r である。しかし、この定義では、無限遠を含みかつ地球の曲率などの影響があるため実用的ではない(横山ほか, 1999)。そこで、角度の計算に含める水平距離の範囲を L_m に限定したものを距離 L の地上開度と呼ぶ(図3)。距離および方位を変えた予備的な解析結果から、本論文では距離 500m の西の地上開度を利用することとした。

(4) 日射量

直達日射量の強さは、地表面(斜度 θ と傾斜方位 ϕ) の法線ベクトルと太陽入射角のなす角 β の余弦に比例する。したがって、太陽高度を E 、方位を A とすれば、次の式で表される。

$$\cos\beta = \cos\theta \cos E + \sin\theta \sin E \cos(\phi - A) \quad (6)$$

図4に対象地域における春先(4月1日)の太陽高度と方位の時間変化を示す。このデータから各地点における一日の直達日射の強度が推定できる。本論文では30分ごとの値を足しあわせて、総日射量に相当する量を計算した。

3.3. 現存植生図の処理

環境庁自然保護局では昭和48年から自然環境保全基礎調査(緑の国勢調査)を実施している。第2回および第3回の調査結果は5万分の1の現存植生図として刊行されている。また第3回および第4回の調査結果はデジタル化(ベクターデータ)されており、CD-ROM版が利用できる。

本研究では、岩手県の植生図のCD-ROM版を手し、ラスターデータに変換した。第3回の調査結果は昭和58年から61年にかけてまとめられたものだが、対象となったのは昭和50年代前半の植生と考えられる。荒廃地データとの時代的な整合性を考

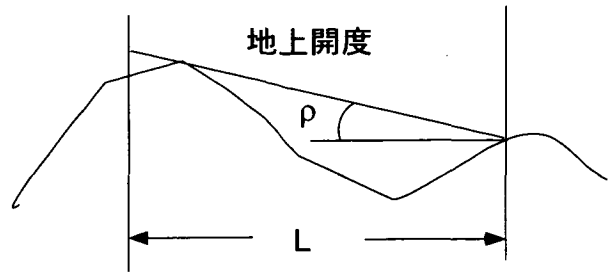


図3 距離Lの地上開度

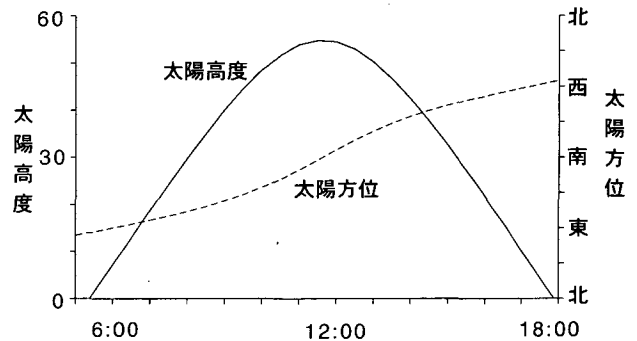


図4 太陽高度と方位の時間変化

えて、本論文では第3回の調査結果を用いる。

大川地区では10種の現存植生区分がえられた。解析のために、これを森林、植林、草地、水域の4つに再分類した。植林の領域は伐採直後は裸地となるため、周りの草地の荒廃に影響を与える恐れがあるだけでなく、領域自身が荒廃地となる可能性がある。そのため、植林を純粹の森林と区別して考えることにした。

この植生図を用いて森林の防風効果を評価した。すなわち、図5の斜線で示した対象地点の西側の斜線領域の9画素のうち森林である画素の数を森林の防風効果とした。斜線の領域を狭くした場合に説明力が低下することは確認したが、今後、領域の取り

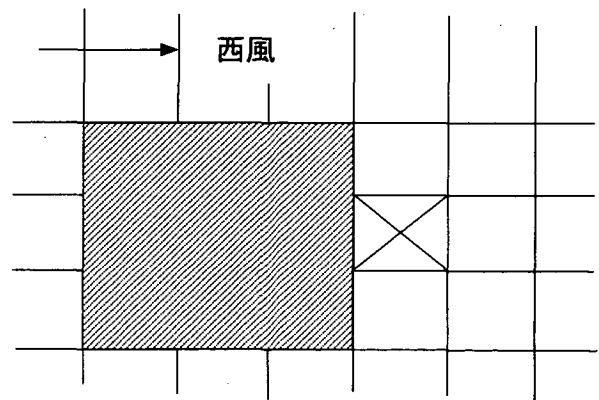


図5 森林の防風効果

方や樹高などの影響についての解析も必要となろう。

3. 4. データセットの作成

解析の基本方針から、標高 800m 以上で草地や裸地に分類される地点が対象となる。表 1 に植生図と風食荒廃図からえられた対象項目の画素数を示す。対象地域の中で標高 800m の画素数は全体の 74 %、その中に草地・裸地が 8 % 含まれる。一方、荒廃地は 496 画素、全体の約 0.5 % である。

風食荒廃地は、ほとんどが草地・裸地に分類されているが、中には森林域や植林域に分類されるものがある。植林した箇所が荒廃することは考えられる

表 1 対象となる画素の分類

植生大分類	標高 800m 以上	荒廃地
森林域	40976	70
植林域	17833	18
草地・裸地	7372	408

が、森林には本来荒廃地は存在しない。したがって、これらは植生図あるいは風食荒廃の調査データの誤差と考えられる。本論文では、草地と裸地に加えて植林における荒廃地を解析のためのデータセットに含めることとした。この結果、標本は 7390 地点、

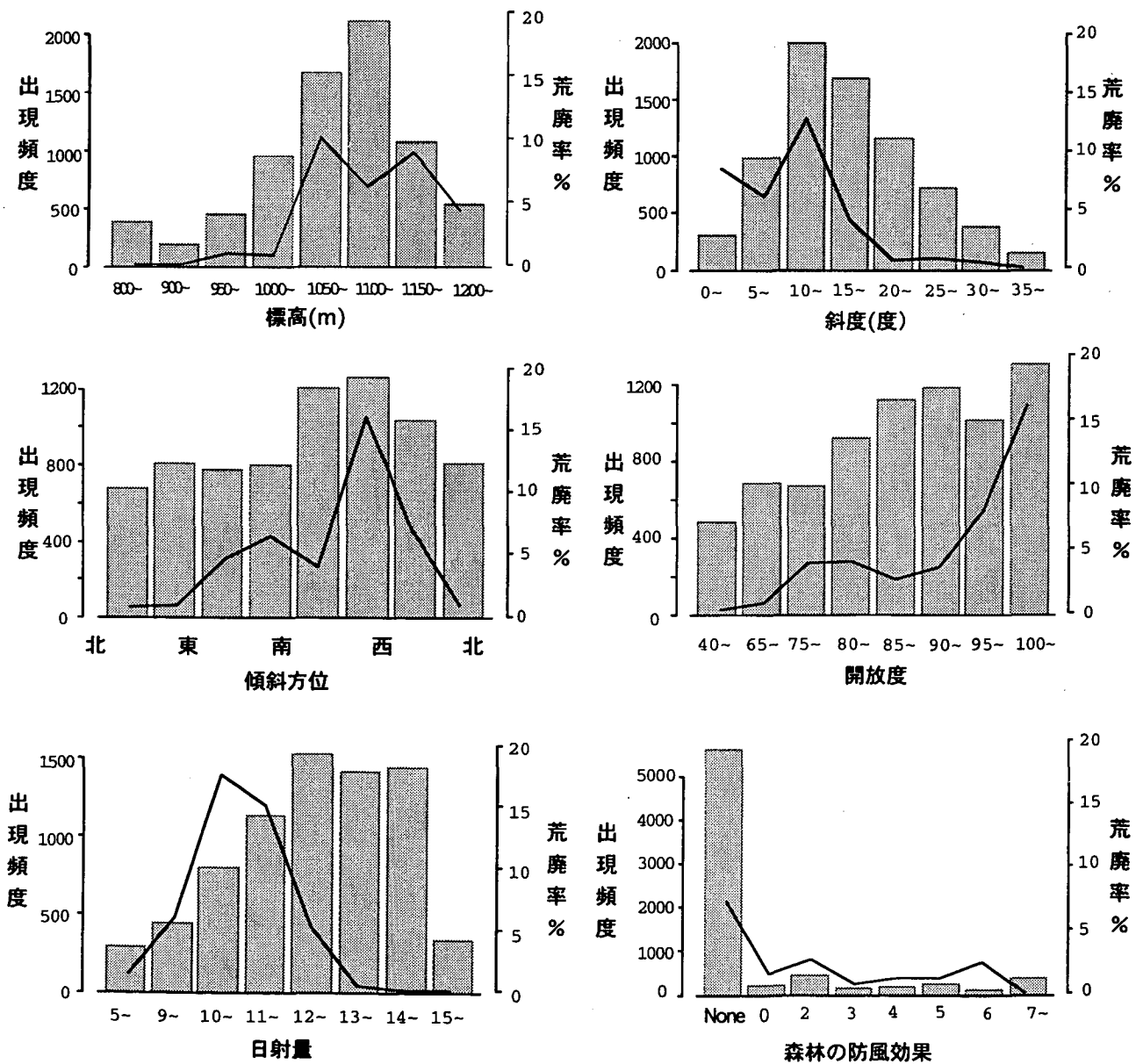


図 6 環境要因とその頻度分布 (棒グラフ：出現頻度, 線グラフ：荒廃率)

うち荒廃地が 426 地点 (5.8 %) となった。

ここで取り上げる要因は、風食荒廃以外はすべて数値変量として各標本毎に求められる。しかし、風食荒廃に対する個々の要因の非線形な影響や要因間の交互作用を考えると、類別変量として取り扱う方がより詳しい検討が可能である。また、傾斜方位には順序的な関係はないため、本来数値変量には馴染まない。要因の説明力をできるだけ公平に評価するという目的から、ここではすべての説明変数をできるだけ均等な間隔で 8 カテゴリーに類別化する。

図 6 に類別したカテゴリーの頻度分布を示した。全体の出現頻度と風食荒廃地の割合 (荒廃率) を比較することにより、荒廃要因が定性的には推測できる。例えば、荒廃地が標高 1000 ~ 1200m で、南から西の斜面に多い。日射量については、やや少なめのときに荒廃率が高くなっている。しかし、複数の要因間の相関や交互作用まで踏みこむには一般化線形モデルのようなより厳密な統計モデルを利用した解析が必要になる。

4. データセットの解析

作成したデータセットに対して、一般化線形モデルを適用した。S 言語 (チェンバース・ヘイスティ, 1994) では、次のようなコマンド glm を用いて解析することができる。

```
> kekka <- glm
(model = RAC ~ Z + SLP + ASP + KAI + NIS + FOR,
 family = binomial, data = kouhai)
```

model は、荒廃確率 RAC を 6 つの要因 (標高 Z, 斜度 SLP, 傾斜方位 ASP, 開放度 KAI, 日射量 NIS, 森林の防風効果 FOR) の主効果で表すことを示す。family (モデル族) として binomial (2 項分布) が指定されているが、これにより一般化線形モデルのリンク関数や誤差分布などが特定化される。data では使用するデータセット (kouhai) を指定する。

得られた結果の概要は次のコマンドで見ることができる。

```
> summary (kekka)
```

この時の当てはめの尤離度は 2130 (自由度 7347) であった。線形モデルにおける誤差の全平方和に当たる全尤離度は 3258 (7389) であった。したがっ

て、1 自由度当たり尤離度が 26.9 減少したことになる。

要因が 1 つの場合の結果を表 2 に示す。森林の防風効果の尤離度が一番大きく、単独ではほとんど荒廃発生の確率を説明できない。また斜度や方位の尤離度が開放度や日射の場合よりも小さいことも注目される。

要因を 2 つにした場合の結果を表 3 に示した。右上が主効果のみの場合、左下が 2 次の交互作用を含めた場合である。尤離度は斜度と傾斜方位の組み合わせが小さいが、交互作用も入れると標高と傾斜方位の組み合わせが一番小さくなる。しかし、すべての要因を組み合わせただけの場合に比べれば、尤離度はかなり大きく、荒廃発生のモデルとして不十分と考えられる。

次に荒廃率を説明するのに必要かつ十分な要因を検討する。前述した発生メカニズムの類型化 (2.3 節) から標高、開放度、日射量、森林の防風効果で荒廃率がかかり説明できることが期待される。これらの主効果をモデルとした場合、尤離度は 2249 (7361) となり、全要因を組み込んだモデルと同等の説明力を得た。また、開放度と日射量の代わりに斜度と傾斜方位をモデルに入れた場合、尤離度は 2302 (7361) に増加した。春の融解現象に影響を与える因子 B として、開放度と日射量の有効性を示唆する結果であると考えられる。

表 2 単独な要因モデルにおける尤離度

要因	標高	斜度	方位	開放	日射	森林
尤離度	3023	2919	2914	2925	2948	3137

表 3 2 要因モデルにおける尤離度

要因	標高	斜度	方位	開放	日射	森林
標高	--	2752	2648	2678	2723	2908
斜度	2653	--	2642	2649	2730	2823
方位	2484	2536	--	2765	2803	2731
開放	2522	2564	2698	--	2705	2706
日射	2557	2664	2749	2611	--	2832
森林	2888	2766	2668	2660	2772	--

説明変数から森林の防風効果を取り除いて、その影響を検討した。標高、開放度、日射では尤離度は2460 (7368)、標高、斜度、傾斜方位では2426 (7368) とかなり増加した。発生メカニズムに忠実な組み合わせでは、1つの要因を落とすことの影響が大きいと考えられる。

これらの要因 (自由度が7) を自由度が1の正規化された線形式 (対比) に分解することにより、単純な形で荒廃確率の変化を説明できる (田口, 1976)。とくに数値的な変量の場合には多項式対比への分解が有効である。図7に多項式対比の最大次数と尤離度の変化を示した。開放度と日射量では低次の項をとるだけでも尤離度がかなり減少するのに対して、斜度と傾斜方位では高次の項の影響も大きい。すなわち、日射量や開放度は2次式までの数値変量としたより単純なモデル化が可能である。

より単純なモデル化ということでは、標高も2次の多項式対比で十分であり、森林の防風効果は西側に一つでも森林があるかないかの2水準でも十分説明力があった。この時の尤離度は2368 (7382) であり、1自由度当たりの尤離度の減少は127.1と極めて高い。この時の母数とt値を表4に示す。なお、これらの要因の間の相関係数は最大で0.145 (開放度の1次式対比との日射量の2次式対比) と非常に小さかった。したがって、これらの変数に関しては、多重共線性などの問題 (平野・茅, 1998) は発生していない。

日射量については、大きくなればなる程、荒廃率が高くなるという1次式対比の効果が一番大きい。2次式対比も無視できない。凍結融解が日射量

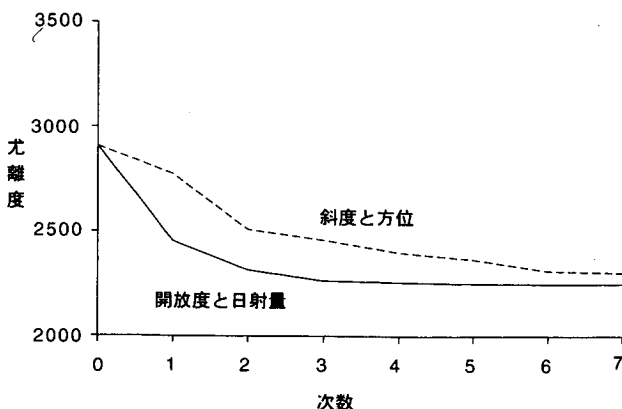


図7 多項式対比の次数と尤離度の変化

や温度だけではなく、土壌や地質などの影響が大きいことも知られており (岩田, 1998)、今後これらの要因を含めた解析が必要と考えられる。

なお、同じ条件で、すべての交互作用を考慮した場合の尤離度は2177 (7364) となった。すべての変数の主効果のみのモデルと尤離度はほぼ同じであるが自由度は大きい。しかし1自由度当たりの尤離度の減少は43.2とそれほど大きくない。種々の組み合わせの交互作用についても検討したが、自由度の増加に見合った尤離度の減少は見られなかった。

5. おわりに

大川地区を対象とした1977年の風食荒廃地について、その環境要因の統計解析を行った。環境要因には、標高、斜度、傾斜方位、開放度、日射量、森林の防風効果の6要因 (それぞれ8水準) を取り上げて荒廃率を推定する一般化線形モデル (ロジスティック回帰) を作成した。

解析の結果、標高、開放度、日射量、森林の防風効果の4つの変数の組み合わせが荒廃の発生確率の説明力が大きいことが明らかになった。これらの一つでも落とすことは説明力の大きな減少につながるため、従来の研究ではほとんど論じられることなかった森林の防風効果を定量的に評価できた。また、標高、開放度、日射量の影響は類別変量ではなく単純な数値変量 (2次多項式) でモデル化でき、森林の防風効果は西側に森林が存在するかどうかという2水準でモデル化できることも示した。しかし、単純に日射量が多いことだけが荒廃率を大きくするわけではないことなど、発生のより詳細なメカニズム

表4 推定したパラメータとその有意性

	推定値	標準誤差	t 値
切片	-5.54	0.20	-27.45
標高 (1次式対比)	135.94	15.16	8.99
標高 (2次式対比)	-114.75	12.36	-9.29
開放 (1次式対比)	68.88	6.61	10.43
開放 (2次式対比)	50.00	6.05	8.27
日射 (1次式対比)	148.18	16.50	8.98
日射 (2次式対比)	-92.63	14.00	-6.66
森林	-1.29	0.11	-11.42

を踏まえた学際的な検討が必要であると考えている。今後、衛星画像を用いた広域の風食荒廃地の抽出、北上高地全体のモデル化（緯度、地質などの要因の影響を含む）、森林伐採による風食荒廃の予測、復旧対策や温暖化の影響についても解析を進めていきたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、(社)東北地域環境計画研究会の村井宏会長はじめ、多くの方々に協力していただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 飯倉善和・横山隆三 (1998) ランドサットTM画像の正射投影とその評価, 写真測量とリモートセンシング, **37** (4), 63-68.
- 飯倉善和・横山隆三 (1999) ランドサットTM画像の大気および地形効果の補正, 日本リモートセンシング学会誌, **19** (1), 63-68.
- 岩田悦行 (1971) 北上山系の二次植生・特に草地植生に関する生態学的研究, 岐阜大学農学部研究報告, NO. 30.
- 岩田修二 (1998) 北上山地での周氷河プロセス研究の特徴, 地形, **19** (4), 265-271.
- 岩手県森林保全課 (1977) 北上山系風衝荒廃裸地現況調査報告書, 1-9.
- 岩手県治山林道協会 (1978) 北上山系風衝荒廃裸地現況調査報告書, 1-6.
- 角田里美・飯倉善和・横山隆三 (1997) 北上高地の風食荒廃要因の統計解析, 地理情報システム学会学術講演会論文集, 99-100.
- 小疇 尚 (1991) 山を読む, 140-147, 岩波書店.
- 小疇 尚・澤口晋一 (1988) 人為がまねいた氷期の景観, 科学, **58** (9), 548-566.
- 澤口晋一 (1987) 北上山地山稜部の荒廃裸地における凍結・融解による斜面物質移動, 地理学評論, **60**, 795-813.
- 水利科学研究所 (1980) 北上山地の特殊地域における保全調査, 159-171.
- 高橋宏治・岸原信義 (1976) 荒廃裸地発生要因の検討, 北上北岩手広域農学関連調査報告書, 林野庁, 243-290.
- 竹内 啓編 (1989) 統計学辞典, 428, 東洋経済.
- 田口玄一 (1976) 実験計画法 (上), 42, 丸善
- チェンバース, M. J., ヘイスティ (1994) Sと統計モデル—データ科学の新しい波—, 共立出版.

平野勇二郎・茅陽一 (1998) 関東平野南部における都市気温分布の時空間構造解析, GIS—理論と応用, **6** (2), 1-10.

村井宏・北田正憲 (1972) 放牧共用林野における山地荒廃の実態, 第83回日本林学会学術講演集, 356-358.

横山隆三・白沢通生・菊池 祐 (1999) 開度による地形特徴の表示, 写真測量とリモートセンシング (印刷中).

McCullagh, P. C. and Nelder, J. A. (1989) Generalized Linear Models, 2nd edition, Chapman and Hall.

Searle, S. R. (1971) Linear Models, Wiley and Sons.