

論文

衛星リモートセンシングによる1983年4月の久慈市林野火災の被害度分析

後藤 健介*・後藤恵之輔**・豊福 高士***

Damage Analysis of the April, 1983 Kuji Forest Fire by Using Satellite Remote Sensing

Kensuke GOTOH*, Keinosuke GOTO** and Takashi TOYOFUKU***

Abstract

The aim of this study is to determine the optimum vegetation index for analysing damage due to a forest fire and to obtain a damage-degree map of the forest fire based on the optimum vegetation index, by using satellite remote sensing. The forest fire which occurred at Kuji City, Iwate Prefecture on April 27, 1983 was treated, Landsat/MSS data before and after the forest fire were used, and six vegetation indices namely RVI, DVI1, DVI2, NDVI, TVI and GVI were compared in order to decide the optimum vegetation index. The F-test together with the t-test was carried out for the ratio of the individual vegetation index before and after the forest fire resulting in it that DVI2 was the optimum. Lastly the damage-degree map of the forest fire was obtained by the optimum DVI2 vegetation index, being very appropriate in comparison with in-situ survey and the air photo analysis.

キーワード：林野火災，リモートセンシング，植生指標，F検定，t検定

Key Words : Forest fire, Remote sensing, Vegetation index, F-test, t-test

1. はじめに

森林は、我々の生活に欠かすことのできない木材や、果実・山菜などの食べ物を供給してくれる。しかしながら、この経済的機能のほかに、水源涵

養、土砂流出防止、保険休養の場の提供といった公益的機能も、森林の重要な機能の一つである。すなわち、森林は林産物の生産と供給をするだけでなく、環境を守ったり、生物を保護したり、

* 長崎大学大学院海洋生産科学研究科博士課程
Graduate School of Marine Science and Engineering,
Nagasaki University

** 長崎大学大学院生産科学研究科
Graduate School of Science and Technology, Nagasaki
University

*** (有)豊福組
Toyofuku-gumi, Co., Ltd.

本論文に対する討論は平成13年1月末日まで受け付ける。

我々の心に安らぎを与えたりと、一つの機能だけでなく、たくさんの機能を合わせ持っている^{1),2),3)}。

この森林が焼失することは、これらの効用および機能が果たせなくなり、我々の生活にも多大の影響を及ぼすことになる。森林焼失の原因の一つに林野火災がある。林野火災の被害は、林木、更新稚樹の焼失だけでなく、近隣の集落、市街へ延焼することも少なくなく、さらには野生生物の生息場所を奪い、ときには人命をも奪ってしまう。

この林野火災の調査解析は、山間部は起伏があるうえに火災当時は危険な状況であるため、十分な調査は困難である。また、航空写真や現地調査結果などから判断する従来の災害調査では、調査解析を行う人の主観が含まれてしまい、定量的な調査は難しかった。ほかの自然災害の調査解析も、同様の問題を含んでいる。これらの問題を解決する手段として、最近では、対象物に直接触れることなく広域に連続した面の情報が得られ、定性的かつ定量的に解析できるリモートセンシング技術を用いた解析が行われている。この場合、「植生指標」を求め、その変化によって被害の実態を調査することが多い。

しかし、植生指標にはいくつかの種類があり、それぞれの求め方および値は違う。このことから、現在種々の研究において用いられているNDVIなどの植生指標が、林野火災の調査解析を行う上で、最も適したものであるのか分からない。リモート

センシングを用いた林野火災の既往の研究については、例えば林野火災後の森林の回復度を検討した岩神・松英らの研究⁴⁾などがあるが、用いた植生指標の適否について述べたものは、著者らの知る限り見当たらないようである。

そこで、本研究では、林野火災の調査解析における最適の植生指標の決定を目的とするものである。すなわち、1983年4月27日に起こった岩手県久慈市の林野火災を例に取り、衛星リモートセンシングデータから数種類の植生指標を算出し、それぞれの統計量からF検定およびt検定^{5),6),7)}を行うことで、どの植生指標が本林野火災における被害状況の把握において最も適しているかを決定する。さらに、求めた植生指標の解析結果から被害度分類図を作成するとともに、被害度別の被害面積を算定する。最後に、精度の検証を、地形図上に描いた被害度分類図について火災の広がり方などを検証するとともに、算定した被害面積を久慈市当局が現地調査により求めた値と比較することで行うものである。

2. 研究対象地

研究対象地は、図1に示すように岩手県久慈市の広域林野火災地とした。この林野火災地がある岩手県久慈市は、陸中海岸国立公園の北部に位置し、人口4万人、面積325.66 km²で、そのうち山林は2万6629 haあり、久慈市の面積の81.8%を占める。また、研究対象地は久慈市の南東部に

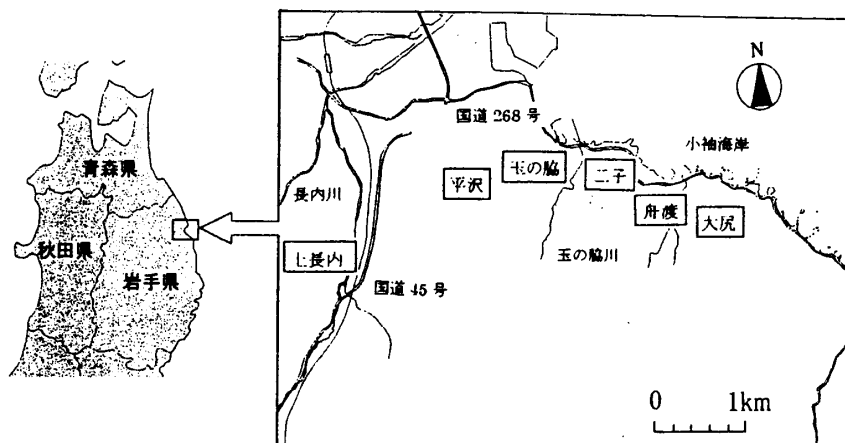


図1 研究対象地

位置しており、被災当時、大半が広葉樹を主とした天然林からなっていた。山林の森林地帯の植生は、コナラ群落を主体として、ケヤキ、アカマツなどで構成されていた。スギ、ヒノキなどの植林地の大規模なものはみられなかった。

3. 久慈市林野火災の概要

1983年4月27日、東北地方を中心に全国各地で山火事が起こった。この時期、東日本を中心に強風が吹き荒れ、また、空気が異常に乾燥していたことも重なり、東北6県と石川県を含め27箇所で大規模な山火事となった。

図2はその一つとして起こった久慈市林野火災の発生、延焼等の状況を示すものである。4月27日午後0時過ぎ、岩手県久慈市長内町上長内付近において山林から火の手が上がった。地表面の枯れ草、笹およびアカマツの天然林を燃焼、南方に延焼拡大し、3時間後には約10haを焼失した。延焼中、突風にあおられ約600m離れた平沢山林の山麓の枯れ草に火の粉が飛び火した。さらに、コナラ群落等の林野を山頂に向かって北東に延焼し、稜線から東側の玉の脇方向と二子および大尻方向に、林野や原野を覆っている枯れた雑草・低木や落葉落枝などが燃える地表火、主に樹木の樹冠(枝葉)部分を燃やす樹冠火⁸⁾となって急速に広がっていった。午後4時40分頃には玉の脇、舟渡地区の建物に飛び火し、その後、二子、大尻

地区の建物にも飛び火した。火災は、ヘリコプターによる空中消火などの大規模な防御活動により、火災発生から2日後の4月29日午後3時30分に鎮火した^{9),10)}。

火災発生当時、この地域において、表1に示す

表1 当時の久慈市の気象状況および気象情報経過¹⁰⁾

天 候	晴
風 向	北 西
平均風速	5.2m/sec
最大風速	10.0m/sec
気 温	24.5°C
湿 度	17.0%
15日の瞬間最大風速	28.8m/sec
観測日時および場所	4月27日12時 久慈消防署
最終降雨日からの経過日数	8日
4月23日	11時15分 異常乾燥注意報 強風注意報発令
4月27日	17時20分 強風注意報解除
4月28日	21時30分 強風注意報追加 発令
4月29日	5時15分 異常乾燥注意報 解除
4月30日	10時10分 異常乾燥注意報 発令 16時50分 強風注意報解除

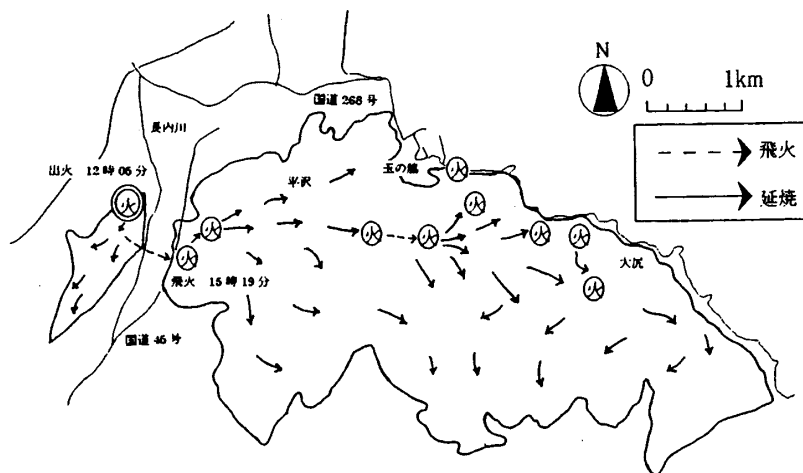


図2 久慈市林野火災の動態図 (原図は文献9)より引用)

ように4月23日には異常乾燥注意報および強風注意報が発令されており、火災が発生しやすく、しかも延焼しやすい状況であったことが分かる。また、全国の林野火災被害状況を示した表2から明らかなように、この年は他の年と比べ、出火件数が少ないにもかかわらず焼失面積が大きかった¹¹⁾。このことは火災の規模が大規模なものが多かった、換言すれば一度の火災で広く燃え広がっていることを示している。しかも、北陸地域は4、5月に林野火災が多く発生する危険な時期であることが知られている¹²⁾。今回の火災が起きた時期は、林野火災が発生しやすく、しかも大規模な火災が多かった年であったのである。

表3に今回の林野火災での被害状況を示す。焼

表2 過去の林野火災被害状況(全国)¹¹⁾

年次	出火件数(件)	焼失面積(ha)
1977	5227	5556
1978	7208	7730
1979	5534	3959
1980	4120	5307
1981	3709	1969
1982	4579	3136
1983	3918	7666
1984	4786	3727
1985	4155	4924
1986	4838	4893

表3 久慈市林野火災の被害状況⁹⁾

人的被害(軽傷)	4人
住宅	7097 m ²
棟数	45棟
世帯数	61世帯
人数	217人
山林被害(民有林のみ)	
被害面積	1035 ha
針葉樹	397
広葉樹	618
未立木地	20
被害額	21億3934万1千円
教育関係	1100
簡易水道	1840
消防施設	2900
農業関係	1100
山林被害	733020
漁業関係	600965
商工関係	216500
観光関係	47500

失面積は久慈市の山林全体の約3.9%に過ぎないが、この年の全国の林野災害による焼失面積の約13.5%に当たる(表2参照)。また、被害額は山林被害が最も多く、次いで漁業関係の被害が多い。

4. 解析方法

4.1 方法の概説

植物は、林野火災などの災害に遭うと、生育機能が阻害されて活力が落ちる。すなわち、植物活性が低下する。この植物活性を表わす物理量に植生指標がある。植生指標は、植物における分光反射特性(各波長域における物質個有の反射率の特性)の植物活性度による違いから求めるもので、数値で表わすことができる。植物が林野火災などの被害を受けると、この植生指標の値が小さくなり、植物活性が低下していることになる。反対に、この値が大きくなると植物活性が良いことになる。本研究では、このことに着目して火災前後でそれぞれ植生指標を求め、林野火災が起こったことによって植物活性がどのように変化したかを調べる。以上の解析を、広域に連続した面の情報が得られ、定量的かつ普遍的に解析できる衛星リモートセンシングの技術を用いて行う。

解析方法のフローチャートを図3に示す。今回の解析にはLANDSAT 3号および4号のMSSデータを用い、火災前のデータとして1979年5月21日観測のものを、火災直後のデータとして1983年5月2日観測のものを使用した。現在では種々の衛星データがあるが、当時はこのLANDSAT/MSSデータしかなかったこと、また火災直後のデータに対応する同時期の火災前のデータとして、1979年5月21日のそれが火災発生に最も近いデータであったことを付記しておく。

まず、MSSデータの中から研究対象地のデータを切り出し、前処理として幾何補正および大気補正を行う。次に植生指標を計算するのであるが、植生指標にはいくつかあり、それぞれ値が異なるため、林野火災の被害状況把握に最適なものを選ぶ必要がある。そこで、MSSデータのうち、植物の反射特性の変化を最も強く捉えるBand 7(近赤外域)のシュードカラー画像から、被害度分類

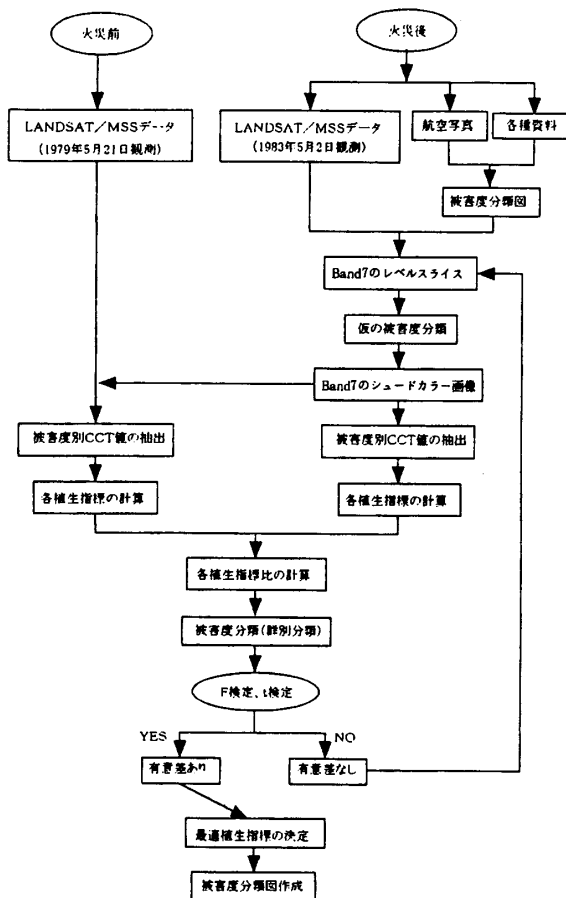


図3 解析方法のフローチャート

図を人為的に作成し、航空写真から作成された被害度分類図¹³⁾(図5参照)と可能な限り一致するように、Band 7をレベルスライスする。すなわち、航空写真の解析結果を参考とする、いわゆる教師あり判別を行い、仮の被害度分類図を作成するのである。

次いで、Band 7のシュードカラー画像から作成された仮の被害度分類図において、それぞれの被害度の地域で火災前後の数種類の植生指標を求める。そして、火災前と火災後の植生指標を比較し、被害度別に分類(群別分類)する。この群別分類の有意性が確認された植生指標を、林野火災における被害状況の把握に最適のものとするのである。逆にどの植生指標においても群別分類に有意性が確認されなければ、再度教師あり判別によってBAND 7をレベルスライスし、群別分類に有意性が確認されるまで仮の被害度分類図を作成し直

す。

分類の有意性が確認された植生指標については、被害度判別のために被害度分類の境界値を決定し、被害度分類図を作成する。また、Band 7のみの比も群別分類の有意性を確認する。もしBand 7のみの比で有意性が確認されれば、植生指標を用いなくてもBand 7のみで被害度分類図を作成できることになる。

以上の有意性の有無についての検定は、F検定およびt検定を用いた。この検定により決定された最適植生指標を用いて、詳細な被害度分類図を作成するのである。

被害度分類図を作成する場合、今回のように航空写真を教師としてバンド7で新たな被害度分類図を作成し、これを教師とする方法と、航空写真を教師として、直接に被害度分類図を作成する方法の2通りが考えられる。本研究において、前者の方法で行ったのは、仮に後者の方法のように航空写真を最終的な教師とした場合、各種植生指標の被害度分類図を比較するのに、比較の基となるものがなくなり比較が困難になるためである。

4.2 使用した植生指標の種類

今回用いた植生指標は次の6式である¹⁴⁾。

$$\begin{aligned}
 RVI &= \text{Band 7} / \text{Band 5} \\
 DVI 1 &= \text{Band 7} - \text{Band 5} \\
 DVI 2 &= 2.40 \times \text{Band 7} - \text{Band 5} \\
 NDVI &= (\text{Band 7} - \text{Band 5}) / \\
 &\quad (\text{Band 7} + \text{Band 5}) \quad \dots\dots (1) \\
 TVI &= \sqrt{NDVI + 0.5} \\
 GVI &= (-0.29 \times \text{Band 4}) - (0.56 \times \text{Band 5}) \\
 &\quad + (0.60 \times \text{Band 6}) + (0.49 \times \text{Band 7})
 \end{aligned}$$

ここに、Band 4～Band 7は、LANDSAT/MSSのそれぞれのバンドの輝度値(CCT値)である。

これらの植生指標を火災前後で計算して次式のように比をとれば、火災後にどれだけ植物活性が変化したかが分かる。

$$\text{植生指標比} = (\text{火災前の植生指標値}) /$$

(火災直後の植生指標値) … (2)

すなわち、今回の植物活性の変化は次式によって求められる。

植物活性の変化 = (1979年5月21日の植生指標値) / (1983年5月2日の植生指標値) … (3)

シーンが異なると、季節的变化によって植生指標の値が違う値を示すことが考えられるため、今回はできるだけ観測日が近い衛星データを選んだ。このことから、同じ場所であれば植生指標の比が1より大になっている箇所が、植生指標の値が火災前に比べて低下しており、火災の被害を受けたところと判定される場所である。

4.3 最適植生指標の決定法

最適植生指標を決めるには、各植生指標の比を計算することで求められる被害度分類に、有意性があるかどうかを確認すれば良い。この確認はF検定およびt検定を用いて行い、式(1)の各式で計算された災害前後の植生指標の比を被害度別に分類し、その分類された各群類(各被害度)が、それぞれ独立したものであるのかを求めるのである。群類が独立しているのが確認できれば、その被害度分類には有意性があることになる。

まず、航空写真から作成された被害度分類図(図5参照)をもとに、Band 7から教師あり判別を行って被害分類し、仮の被害度分類図を作成する。この図から被害度別に任意に30画素を抽出し、火災前後の各画素のバンドごとのデータをCCTより取り出す。そして、これらの取り出した被害度別画素データを式(1)の各式に代入し、火災前後の各植生指標を求めてその比を計算する。次に、得られた計30点の比の値を各植生指標ごとに被害度別に、被害が大きいものから被害度大、中、小、なしの4群に整理する。すなわち、これら4群は図6に示すBand 7のシェードカラー画像から分類したものである。

これら各群類のCCT値から、それぞれの平均値、平方和、分散、不偏分散などの統計値を求め

る。これらの統計値の中の平均値と標準偏差から求められる測定値のばらつきは、各群の植生指標比の境界値、すなわち各被害度の境界値の目安となり、以下の式による。

(測定値のばらつき) = $\bar{x} \pm \sigma$ …………… (4)

ただし、 \bar{x} は植生指標比の平均値、 σ はその標準偏差である。これらの統計解析結果を用いて検定を行う。

ここで、F検定およびt検定について簡単に説明しておく。統計量で最も重要であり最も広く使われているのが平均値と分散である。これは、平均値と分散が、分布の位置とばらつきなどの母集団分布の特性を表すことができるからである。今回の研究においては、火災の被害度分布の特性を、平均値と分散を用いれば表すことができるのである。そして、その被害度分布の群別分類が偶然なものではなく、正確に分類できたものなのか、群別分類に有意性があるかどうかを確認するために行うのが検定である。分散の差に関する検定をF検定、平均値の差に関する検定をt検定で行う。

各被害度の群は、そのヒストグラムが被害度が大きくなるにつれて図4に示すように右側にずれていくため、本研究では左側検定(片側検定)を行った。

この結果、分類に有意性が確認できれば、群別分類が正しく行われていることになる。本研究では、分散の差に関するF検定と、平均値の差に関するt検定の両検定で有意差があると確認できたものを最適植生指標とした。統計学的には、F検定の結果により有意性の有無が分かり、その有意

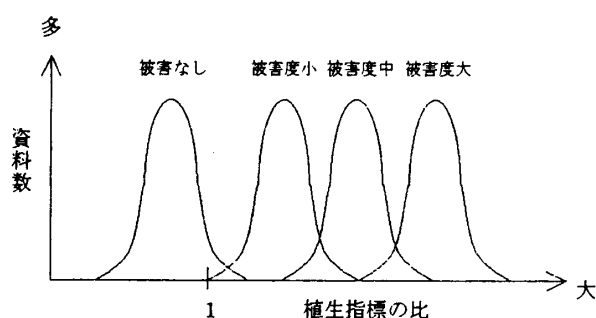
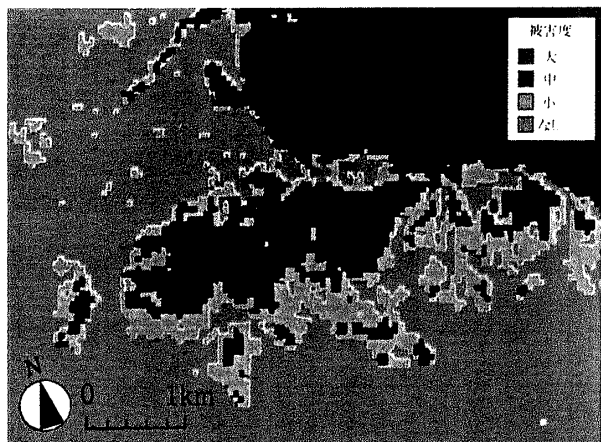
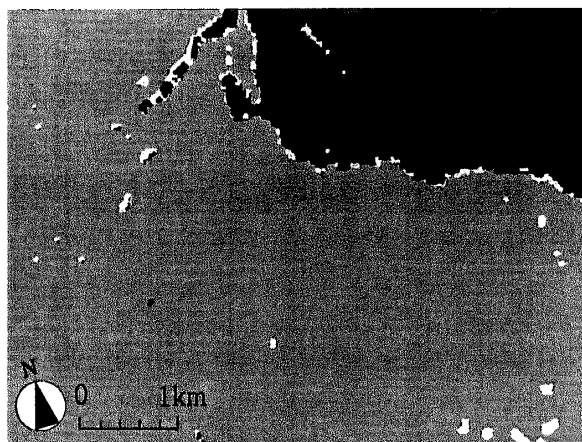


図4 被害度別ヒストグラムの概略図



(a) 火災後 (1983年5月2日)



(b) 火災前 (1979年5月21日)

図6 BAND7のシュードカラー画像

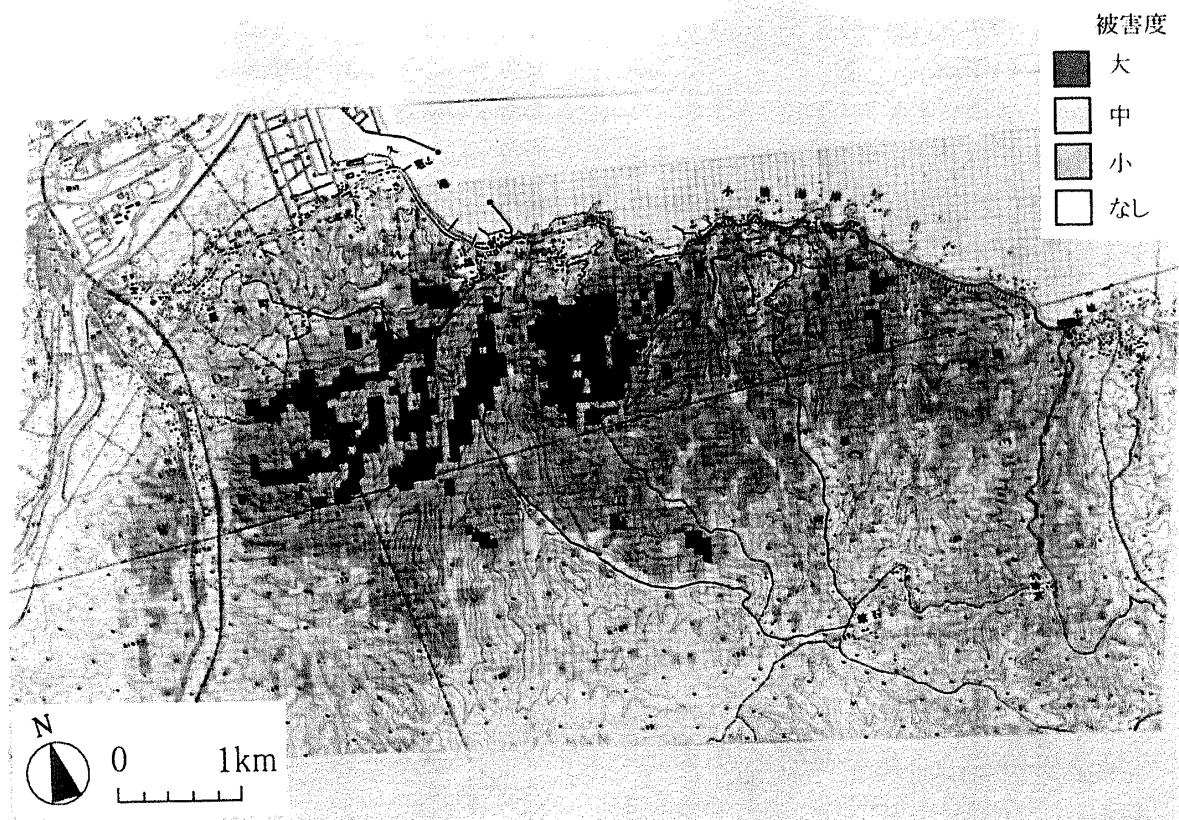


図9 DVI2による久慈市林野火災の被害度分類図

性の有無により t 検定を行うのが通常である。このため、t 検定は F 検定の結果に依存している。しかし本研究では、F 検定と t 検定を独立して行い、両検定の結果から最適植生指標を判断する方法を取った。言い換えれば、両検定をそれぞれ行い、1 群から 4 群まですべてにおいて両検定で有意差があるものを最適植生指標としたのである。この手法は統計学的には正鵠を射ていないかもしれないが、母集団（群）の統計値は平均値と標準偏差であり、この 2 つともに有意差が認められれば、その 2 つの母集団は同じものではないとしていることから、群別分類の的は外していないはずである。

F 値および t 値は以下の式によって、それぞれ求めることができる⁷⁾。

$$F = s_1^2 \dots\dots\dots (5)$$

ただし

$$s_1^2 = \Sigma (X_i - \bar{X})^2 / (m - 1),$$

$$s_2^2 = \Sigma (Y_i - \bar{Y})^2 / (n - 1)$$

ここで、

X_i, Y_i : 植生指標比 \bar{X}, \bar{Y} : 植生指標比の平均
 m, n : 標本数
 s_1^2, s_2^2 : 各標本の不偏分散

また、

$$t = (\bar{X} - \bar{Y}) / s \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n}} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 s^2 は 2 組の共通の分散の不偏推定量であり、次の式で求められる。

$$s^2 = \{(m - 1) s_1^2 + (n - 1) s_2^2\} / (m + n - 2)$$

5. 解析結果

5.1 最適植生指標の決定

図 5 は航空写真から判読した被害度分類図である。この被害度分類図で「被害度 微」は、地表火は及んだものの樹冠火は及んでいないと思われる区域で、MSS データでは判読困難と考えられるため、今回は被害なしとして扱った。この航空写真からの被害度分類図を参考にしながら、Band 7 のシュードカラー画像を、表 4 に示すように CCT 値が 16~19 を被害度大、20~24 を被害度

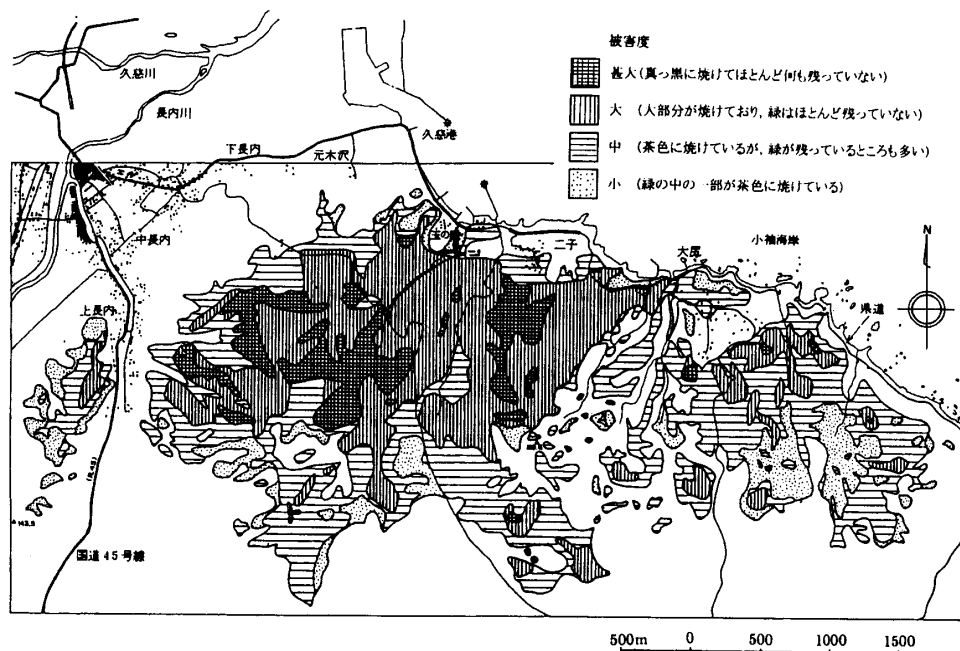


図 5 航空写真による被害度分類図¹³⁾

表4 BAND 7 のスライスレベル

被害度	CCT値
大	16～19
中	20～24
小	25～30
なし	30以上

中, 25～30 を被害度小, 30以上を被害なしとして被害度分類したものが図6 (a) である。何箇所か海と同じ黒色の部分があるが, 山間部などの傾斜がある場所では, 衛星データに影ができることが多くあり, このことによるものと思われる。被害度は, 被害が大きい方から大, 中, 小, なしの4段階とした。この同じCCT値で分類した火災前のものが図6 (b) である。

次に, これらの図から被害度別に任意に30画素ずつCCT値を抽出し, 火災前後の各バンドごとのデータを取り出した。そのスペクトルプロット図を図7に示す。この図をみてみれば, 被害度が大きいほど, Band 7 のCCT値(平均値)が大きく減少し, 植物活性が低下していることが分かる。このことは, 植生指標概念の導入の正しさを裏付けるものであり, 本研究の方法の妥当性を証明するものである。

図7 (d) において, 火災被害を受けていないときにBand 7 のみの比も1以下になっているが, この程度の数値の変化は, 本研究のように自然を対象とした場合, 無視できるものと考え, 植生の季節変化はなかったものとする。

また, これら任意に抽出した30画素のCCT値で各植生指標(式(1)の6式)を求め, 火災前後の比を計算して被害度別の4群(①被害度大, ②被害度中, ③被害度小, ④被害度なし)に整理した。

この各植生指標の比の計算結果から求められた植生指標別の被害度4群について, それぞれF検定およびt検定を行い, 群別分類に有意性があるかを検討した。Band 7 および各植生指標の比の検定結果を表5および表6に示す。ここで有意差

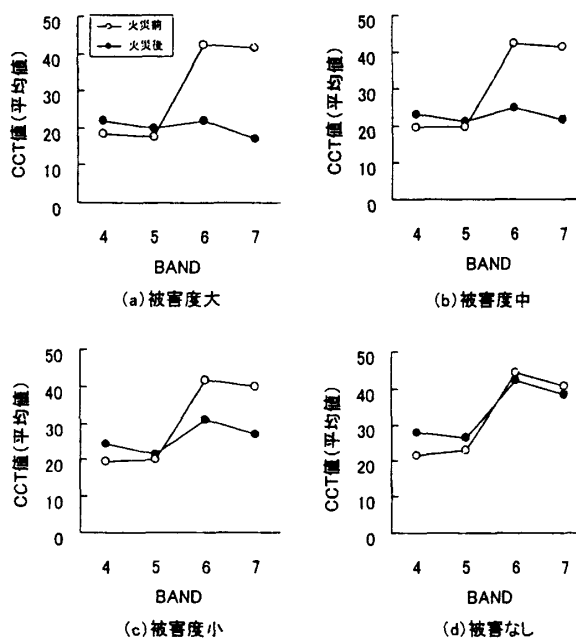


図7 火災前後のスペクトルプロット図

なしと判断された場合は, 各群がそれぞれ独立していないこととなり, 有意性がないということになる。

このことを踏まえて表6をみてみれば, Band 7 においてはF検定に non (有意差なし) があることから有意性が確認されず, Band 7 のみで被害度分類を行うことは困難ということになる。同様にして, RVI, DVI 1, NDVI および TVI にも F 検定または t 検定に non が含まれるため, これらの植生指標では被害度分類ができない。各植生指標の中で有意性が確認されたのは, F 検定, t 検定のいずれにも non がないことから DVI 2 と GVI のみであり, 今回の林野火災の被害度分類解析における最適植生指標は, これら2つの植生指標, DVI 2 と GVI であることが分かった。

なお, これら DVI 2 と GVI が久慈市林野火災の解析に最適であった理由については, 既往の研究で林野火災における最適植生指標の決定を述べたものは今まで無く, また著者らも本研究で初めてその最適植生指標を求めたため, 明記できないことを付記しておく。

表5 各群に属する植生指標比の統計値

(a) BAND7					
群	資料数	平均	平方和	分散	測定値のばらつき
1	30	2.44	2.987	0.100	2.12~2.76
2	30	1.91	2.465	0.082	1.62~2.20
3	30	1.48	2.030	0.067	1.22~1.74
4	30	1.08	0.783	0.026	0.92~1.24

(b) RVI					
群	資料数	平均	平方和	分散	測定値のばらつき
1	30	2.74	4.321	0.144	2.36~3.12
2	30	2.07	2.987	0.100	1.75~2.39
3	30	1.63	3.741	0.124	1.28~1.98
4	30	1.27	3.248	0.108	0.94~1.60

(c) DVI1					
群	資料数	平均	平方和	分散	測定値のばらつき
1	26	-8.54	673.700	25.910	-13.63~-3.45
2	26	3.91	4894.500	188.249	-9.81~17.63
3	30	3.14	143.057	4.769	0.96~5.32
4	27	1.49	11.336	0.420	0.84~2.14

(c) DVI2					
群	資料数	平均	平方和	分散	測定値のばらつき
1	30	3.97	20.996	0.700	3.13~4.81
2	30	2.61	8.352	0.278	2.08~3.14
3	30	1.75	4.060	0.136	1.38~2.12
4	30	1.16	1.595	0.053	0.93~1.39

(d) NDVI					
群	資料数	平均	平方和	分散	測定値のばらつき
1	26	-5.28	224.750	8.645	-8.22~-2.34
2	26	2.88	2310.100	88.849	-6.55~12.31
3	30	2.43	97.585	3.253	0.63~4.23
4	27	1.46	11.180	0.414	0.82~2.10

(e) TVI					
群	資料数	平均	平方和	分散	測定値のばらつき
1	30	1.46	0.232	0.007	1.38~1.54
2	30	1.30	0.145	0.005	1.23~1.37
3	30	1.16	0.203	0.007	1.08~1.24
4	30	1.06	0.261	0.009	0.97~1.15

(f) GVI					
群	資料数	平均	平方和	分散	測定値のばらつき
1	30	9.50	1105.480	36.849	3.43~15.57
2	30	4.28	50.605	1.686	2.98~5.58
3	30	2.27	10.962	0.365	1.68~2.87
4	30	1.31	3.219	0.107	0.98~1.64

5.2 被害度分類図の作成

有意性が確認された DVI2 および GVI について、被害度を判別するため被害度の境界値を決定した。この場合、各植生指標の比の値を式 (3) で計算して範囲を決めた (表4 参照)。これによると、DVI2 を用いた場合、各被害度の植生指標の比の範囲は、第①群 (被害度大) が 3.13~4.81, 第②群 (被害度中) が 2.08~3.14, 第③群 (被害度小) が 1.38~2.12, 第④群 (被害度なし) が

表6 群別分類の検定

(a) BAND7									
群	資料数	自由度	平均	平方和	F 検定		t 検定		t
					不偏分散	分散比	w ²	t	
1	30	29	2.44	2.987	0.103				
2	30	29	1.91	2.465	0.085				
		58	0.53	5.452		1.212***	0.094	6.695**	
2	30	29	1.91	2.465	0.085				
3	30	29	1.48	2.030	0.070				
		58	0.43	4.495		1.214***	0.078	5.963**	
3	30	29	1.48	2.030	0.070				
4	30	29	1.08	0.783	0.027				
		58	0.40	2.813		2.593**	0.049	6.999**	

(b) RVI									
群	資料数	自由度	平均	平方和	F 検定		t 検定		t
					不偏分散	分散比	w ²	t	
1	30	29	2.74	4.321	0.149				
2	30	29	2.07	2.987	0.103				
		58	0.67	7.308		1.447***	0.126	7.310**	
2	30	29	2.07	2.987	0.103				
3	30	29	1.63	3.741	0.129				
		58	0.44	6.728		0.798***	0.118	5.003**	
3	30	29	1.63	3.741	0.129				
4	30	29	1.27	3.248	0.108				
		58	0.36	6.989		1.194***	0.121	4.006**	

(c) DVI1									
群	資料数	自由度	平均	平方和	F 検定		t 検定		t
					不偏分散	分散比	w ²	t	
1	26	25	-8.54	673.700	26.948				
2	26	25	3.91	4894.500	195.779				
		50	12.45	5568.200		7.255**	111.36	4.254**	
2	26	25	3.91	4894.500	195.779				
3	30	29	3.14	143.057	4.933				
		54	0.77	5037.557		39.688**	93.288	0.298***	
3	30	29	3.14	143.057	4.933				
4	27	26	1.49	11.336	0.436				
		55	1.65	154.393		11.314**	2.807	3.713**	

(d) DVI2									
群	資料数	自由度	平均	平方和	F 検定		t 検定		t
					不偏分散	分散比	w ²	t	
1	30	29	3.97	20.996	0.724				
2	30	29	2.61	8.352	0.288				
		58	1.36	29.348		2.514**	0.506	7.405**	
2	30	29	2.61	8.352	0.288				
3	30	29	1.75	4.060	0.140				
		58	0.86	12.412		2.057*	0.214	7.200**	
3	30	29	1.75	4.060	0.140				
4	30	29	1.16	1.595	0.055				
		58	0.59	5.655		2.545**	0.098	7.299**	

(e) NDVI									
群	資料数	自由度	平均	平方和	F 検定		t 検定		t
					不偏分散	分散比	w ²	t	
1	26	25	-5.28	224.750	8.990				
2	26	25	2.88	2310.100	92.404				
		50	8.16	2534.850		10.279**	50.697	4.132**	
2	26	25	2.88	2310.100	92.404				
3	30	29	2.43	97.585	3.365				
		54	0.45	2407.685		27.460**	44.587	0.252***	
3	30	29	2.43	97.585	3.365				
4	27	26	1.46	11.180	0.430				
		55	0.97	108.765		7.826**	1.978	2.554*	

(f) TVI									
群	資料数	自由度	平均	平方和	F 検定		t 検定		t
					不偏分散	分散比	w ²	t	
1	30	29	1.46	0.232	0.008				
2	30	29	1.30	0.145	0.005				
		58	0.16	0.377		1.600***	0.007	7.407**	
2	30	29	1.30	0.145	0.005				
3	30	29	1.16	0.203	0.007				
		58	0.14	0.348		1.400***	0.006	7.000**	
3	30	29	1.16	0.203	0.007				
4	30	29	1.06	0.261	0.009				
		58	0.10	0.464		1.286***	0.008	4.330**	

(g) GVI									
群	資料数	自由度	平均	平方和	F 検定		t 検定		t
					不偏分散	分散比	w ²	t	
1	30	29	9.50	1105.480	38.120				
2	30	29	4.28	50.605	1.745				
		58	5.22	1156.085		21.845**	19.933	4.528**	
2	30	29	4.28	50.605	1.745				
3	30	29	2.27	10.962	0.378				
		58	2.01	61.567		4.616**	1.062	7.554**	
3	30	29	2.27	10.962	0.378				
4	30	29	1.31	3.219	0.111				
		58	0.96	14.181		3.405**	0.245	7.512**	

* 5%で有意差あり ** 1%で有意差あり non 有意差なし

0.93~1.39の範囲にある。これらから各被害度の境界値を考えると、第①群と第②群が3.1、第②群と第③群が2.1、第③群と第④群が1.4と考えることができる。これらの結果から被害度の境界値を決定したものが表7(a)である。すなわち、被害度が大きいものから3.1以上、2.1~3.1、1.4~2.1、1.4未満と分類できたのである。同様に、GVIについても表7(b)のように境界値を決定した。

以上のように決定した被害度分類の境界値を基に、DVI2およびGVIの値を被災地全域において計算し、図8(a)、(b)に示すように、それぞれの植生指標による被害度分類図を作成した。因みに、この被害度分類図は、植生指標による被害度分類の結果を2万分の1の地形図に重ね合わせたものである。この被害度分類図作成の結果、GVIによるものは、水域(海)においても被害があるようになってしまったため、最終的にDVI2によるものを今回の被害度分類図とし、これを図9のカラー図に示す。この植生指標の値から求められた被害度分類図は、航空写真による被害度分類図(図5

参照)と比較的類似しており、被害状況を正確に把握できているものと考えられる。なお、本研究による被害度分類図と航空写真からのそれとの比較については、次章で詳述する。

6. 考察

衛星リモートセンシングを用いて被害度分類図を作成できれば、林野火災での焼失面積を求めることができる。すなわち、焼失面積は被害度別の焼失地の画素数に1画素の面積(MSSデータの場合57m×57m)を乗ずることで求められ、表8のようになる。これによれば、被害度大は163.1ha、被害度中が301.5ha、被害度小が500.0haとなり、合計した被災地の焼失面積は964.6haとなる。久慈市当局¹⁰⁾が行った現地調査等では、焼失林野面積は1084.6ha(このうち焼失森林面積は1035.0ha)となっており(表3参照)、今回著

表7 被害度分類の境界値

(a)DVI2

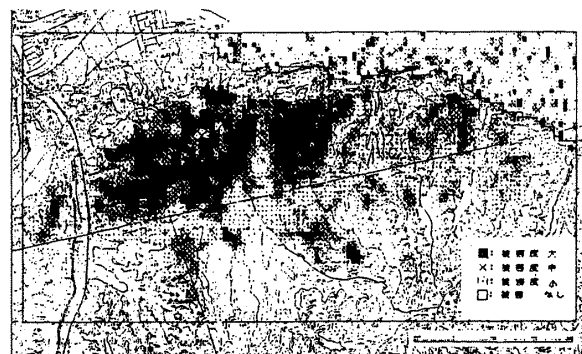
被害度	植生指標比
大	3.1以上
中	2.1~3.1
小	1.4~2.1
なし	1.4未満

(b)GVI

被害度	植生指標比
大	3.5以上
中	2.9~3.5
小	1.7~2.9
なし	1.7未満



(a) DVI2による



(b) GVIによる

図8 久慈市林野火災の被害度分類図

表 8 被害度別の焼失面積

被害度	焼失面積 (ha)
大	163.1
中	301.5
小	500.0
合計	964.6

者らが求めた焼失面積の方が 11%少ない結果となった。

この理由を述べてみれば、今回衛星データとして利用した LANDSAT 衛星の MSS データが平面投影したものであるため、求めた焼失面積も平面の面積であるからである。この結果、衛星データからは、山林のような地形が複雑な場所においては地表火を確認することは困難で、主に樹冠火の焼失面積を求めることとなり、今回のように、現地調査等による焼失面積に比べて衛星リモートセンシングによる焼失面積が少なく求まることは、止むを得ないことと思われる。また、比較の対象となる久慈市当局の焼失面積の算定が、航空写真と遠方からの現地観測によるものであり、厳密なものではないため、本研究で行った衛星データを用いた解析結果とは多少の違いが出たものと考えられる。しかし、本論の目的は最適植生指標の決定であり、厳密な焼失面積の算定は第二義的なものであるため、これ以上の焼失面積の詳細な解析は行わないこととする。

また、今回使用したデータには 4 年間の時間差があるが、コナラ等の木の寿命から考えればその影響はないものと考えられる。

今回作成した被害度分類図は、地形図と重ね合わせたものであるため、地形や植生状況の違いによって林野火災の被害がどうなっているかを知ることができる（地名については、図 1 を参照のこと）。

被害度が大きい地域は、長内町の南側の山林から大尻地区の西側にかけての段丘地形面の緩やかな稜線に沿って分布している。また、この地域に

は針葉樹林が広く分布している。針葉樹は広葉樹と比べて樹皮が乾燥しているうえに樹脂が多く、発熱量も大きい。この地域が延焼しやすい状況であったことが分かる。

被害度が中程度の地域は、出火場所の上長内の山林および長内町から大尻地区にかけて、被害度が大きい地域の周囲のなだらかな丘陵地帯に分布している。南部の山林や大尻以東の山林にも稜線に沿って点在している。

被害度が小程度の地域は最も焼失面積が多く、主に段丘地形面に沿って南部の山林や海岸にまで拡大している。この地域の大部分はコナラなどの広葉樹林である。落葉や下草は焼失したが、広葉樹の樹皮面が硬皮質で凹凸やひだが少ないため、燃えにくかったと考えられる。時期的にも新緑の頃で、葉が水分を含んでいたことも燃えにくかった原因と考えられる。しかし、林野火災の時期がもう少し早い春先であれば、コナラは落葉樹であるため、林内が明るく下草も多く落葉落枝が乾燥して、被害はもっと大きくなっていったと考えられる。

全体の被害状況を見れば、6つの小河川や大きな谷地形で火の勢いが衰えており、田や畑地などでは延焼を大きく阻止していることが分かる。

地形、特に傾斜は火災の拡大に大きく関係し、風が上り斜面に向かって吹いている場合、拡大する速度は大きくなる。久慈市林野火災においても、出火場所と飛び火した場所が上り斜面になっており、北西の風により延焼が拡大しているのが分かる。火勢の衰えは、谷、河川、崖などの傾斜変換部に多く見られることが知られており¹²⁾、今回の火災においてもこの特徴は見られる。しかし、小さな谷地形においてはあまり影響がないようであった。地質においては、林床植生とも関係して花崗岩地帯が林野火災発生の危険性が高いことが分かっている¹²⁾が、玉の脇以東では主に花崗岩類の地質を呈しており、これも火災拡大の一つの誘因となっていると考えられる。

また、本研究で作成した被害度分類図を航空写真から作成されたものと比較してみれば、被災地域は概ね一致しているが、被害度大と被害度中の

分類に差があることが分かる。これは、調査解析者の違いによるものであるが、航空写真によるものは、現地調査と火災後の写真から描いたものであり、調査解析者の主観が含まれている。これに対して、本研究で作成したものは火災前後の植物活性の変化から求めており、植物の分光反射特性に基づいた普遍的な解析によるものである。災害被害の解析を行う場合、調査解析者の主観性が入ることは、毎回の解析結果に違いが出てしまう可能性があり、望ましくない。本研究では、衛星データを用いた衛星リモートセンシングを利用することにより、この主観性の問題を取り除くことができ、普遍的なデータを得ることができた。林野火災などの自然災害は、被害が広範囲で、現地調査に危険性も伴うことから、解析範囲が広く、直接現地に赴く必要もないリモートセンシングを利用した調査解析は、これからも重要となってくるであろう。

7. おわりに

本研究では、久慈市林野火災の被害状況を植生指標を用いて解析する場合、どの植生指標が解析に最適であるかどうかを、F検定とt検定を行うことで確認することができた。さらに、その最適植生指標を火災前と火災後で比較し、どれだけ植物活性度が変化したかを調べ被害度分布図を作成することで、久慈市林野火災の被害状況を詳細に知ることができた。

本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) 解析に最適な植生指標を、F検定とt検定を用いることによって決定することができた。

(2) (1)の結果、久慈市林野火災を植生指標で解析する場合、DVI2およびGVIの2つの植生指標が最適であることが分かった。

(3) 最終的にDVI2を用いて衛星データから解析することにより、従来の踏査等による現地調査よりも、主観が入らない普遍的かつ定量的な解析ができ、詳細な被害度分布図を作成することができた。

自然災害には、林野火災のほかに地すべりや土石流、塩害などがあり、また、これらの被害状況

を把握するために用いられる植生指標自体も数種類あり、根拠なく用いてきた植生指標が、実際にはその解析に適した植生指標であるかは調べられたことがないというのが現況であった。確かに、植生指標は植物活性度を数値化し、種々の自然災害の被害状況を解析するものとして、最近特に注目され使われてきた。しかし、それぞれの植生指標の特性を知らないままに、解析に用いられる場合が多いようである。

今回の研究結果では、久慈市林野火災を例に取って、その解析に適した植生指標がDVI2とGVIであるということが分かった。しかし、このことは久慈市林野火災について言えることで、この2つ以外の植生指標も、必ずしも林野火災の解析に適していないとは断言できず、災害の場所、時期といった当時の様々な状況も、最適植生指標を決定する上で考えていく必要があると思われる。

今回のように、各植生指標値の統計量から被害度別の群別分類のF検定およびt検定を行い、その有意性を確認することで最適指標を決定できたことは、今後、林野火災以外の解析においても同様の方法で最適植生指標を確認していくことができ、それぞれの解析を行う上での目安をつくっていくことができるわけである。このことにより、種々の面において、今よりもさらにリモートセンシングを利用した、正確で詳細な解析を行うことができるかと著者らは確信している。

また、今回の研究では、植生指標から求められる植物活性の変化に着目したことで、広域な林野火災の被害を容易に調査することができた。さらに、植生指標を用いることで植物の内面の変化を解析できるため、現地調査だけでは解析困難な、熱風による枯死や、表面は被害を受けていないように見えるが、実際には活性が低下している場所を見分けることができた。このことは、危険を伴う現地調査と違い、衛星リモートセンシングを利用すれば、現地に行かなくても被害の調査ができることを意味している。

衛星データは航空写真に比べて解像度が低く、地表火による被害などは今回調べることはできなかったが、被災地全体を広域に把握するには十分

であった。最近では、昨年（1999年）9月にアメリカのスペースイメージング社がイコノスという、可視光域において約 80 cm の高解像度衛星を打ち上げ¹⁵⁾、今後も解像度の高い衛星の打ち上げが計画されている¹⁶⁾。今後の衛星リモートセンシングによる解析が、さらに詳細で信頼できるものになると期待される。

今回、林野火災を例に取って研究を遂行したわけだが、我が国の林野火災は、主にタバコ等の人為的なものが出火原因の 99% を占めており¹²⁾、その代償はあまりにも大きい。森林の様々な機能については 1. で述べたとおりであるが、この我々の生活に非常に影響力を持つ森林が、広範囲に焼失してしまうのが林野火災である。我々人間は、自然と共存している。それゆえに自然を大切に、愛する義務がある。林野火災の予防が重要であることは言うまでもないが、被害の状況とその後の回復状況を見守り、詳しく知ることが重要なことで、自然を愛することになるのではないだろうか。本研究では、このことも踏まえて解析を行ったつもりであることを最後に付言しておく。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、協力を惜しまれなかった久慈市災害対策本部には、貴重な資料や情報を提供していただいた。ここ記して深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 江崎春雄・岸上定男・井上嘉幸：水と土と緑のはなし，技報堂出版，218p., 1985.
- 2) (社) 日本林業技術協会編：森林の 100 不思議，東京書籍，217 p., 1988.
- 3) (社) 日本林業技術協会編：続・森林の 100 不思議，東京書籍，219p., 1992.
- 4) 岩神正朗・松英恵吾・柴山善一郎・大年邦雄・松田誠祐：高知県物部村における林野火災の実態と復旧に伴う回復過程に関する研究，自然災害科学，Vol.17, No. 1, pp. 67-82, 1998.
- 5) 山内豊聡・後藤恵之輔・新開節治：統計解析処理による地山しらすの判別分類，土質工学会論文報告集，Vol.22, No. 1, pp.109-115, 1982.
- 6) 春山元寿：硬度によるシラスの工学的判別分類法，応用地質，Vol.16, No.2, pp.40-47, 1975.
- 7) 東京大学教養学部統計学教室編：統計学入門，東京大学出版会，pp.240-245, 1991.
- 8) 日本火災学会編：火災便覧，第 3 版，共立出版，p.565-566, 1997.
- 9) 久慈市災害対策本部：昭和 58 年 4 月 27 日発生した火災の対策及び被害状況，1983.
- 10) 久慈地区広域行政事務組合消防本部：4・27 久慈市長内地区林野火災概要，1983.
- 11) 本多静六：改訂新版森林家必携，(財) 林野弘済会，p.249, 1993.
- 12) 四手井綱英：森林保護学，朝倉書店，pp.142-156, 1987.
- 13) 三宅成治・稲葉千秋・渡辺 徹ほか：久慈地区林野調査での空中写真の利用，APA, No.24, pp.52-59, 1983.
- 14) Manual of Remote Sensing, Vol. II, American Society of Photogrammetry, pp.2148-2153, 1983.
- 15) 朝日新聞，1999.11.5 付.
- 16) (株) 日立製作所：HITACHI/EARTHWATCH, 高分解能衛星画像の御紹介，28p., 1997.

(投稿受理：平成11年6月25日
訂正稿受理：平成12年2月22日)