

1-9 地盤環境とその変化が生態系に及ぼす影響に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 13～平 17

担当チーム：材料地盤研究グループ（地質）

研究担当者：佐々木靖人、伊藤政美

【要旨】

生態系は、その生育基盤である地形・土壌・地質・地下水などの地盤環境に依存することが近年の研究より明らかになってきている。地盤環境を改変・擾乱することの多い土木事業において、生態系に配慮した事業を進めるためには、地盤環境とその変化が生態系に及ぼす影響を適切に予測・評価し、可能な範囲で環境影響を低減することが必要である。そこで本研究では、地盤環境とその変化が生態系に及ぼす影響を適切に調査・予測・評価するための技術体系を確立することを目的として、地盤と生態系の関係学である「地生態学」に着目し、これを工学に応用する「応用地生態学」を提唱するとともに、その体系化を試みた。

キーワード：地盤、地形、土壌、地質、地下水、生態系、地生態学、応用地生態学

1. はじめに

平成11年6月より環境影響評価法が運用され、一定規模以上の事業において、自然環境等に対して環境影響が予測される際には、事業者は環境保全措置（影響の回避・縮小・代償等の措置）の検討を義務づけられた。また、平成15年には自然再生推進法が施行された。これらにより、残存する貴重な自然・生態系の保全と、かつてあった豊かな自然・生態系の復元・再生という、2つの法的な枠組みが整備された。しかし環境保全措置や自然再生のための科学的で具体的な手順と手法は確立されたとはいえない。今後はこのような手順や手法を確立する必要がある。

生態系は、地形・地質・地表水・地下水・気象等が相互に作用する多様な非生物的環境の上に成立する。とくに生育基盤である地形地質環境の多様性は重要であり、貴重種を含め多くの植生は地形地質環境に強く依存する。このような関連性を研究する学問は地生態学ないし景観生態学と呼ばれ¹⁾、国内でも小泉²⁾、横山³⁾などにより研究や普及が進んでいる⁴⁾。土地利用に際して地生態学的な視点を援用して地形地質環境と生態系との関連性を事前に把握できれば、保全すべき範囲・適切な環境保全措置・効果的な自然再生手法などをより合理的に決定できる。しかし一般に、環境アセスメントなどの実務においては、地形や地質は重視されていない。それは、地生態学自体が発展途上であることと、地生態学的な知見を土地利用に活用する具体的な方法論がないことの両面に起因する。

そこでここでは、「静的な地形地質場のみならず動的な地形地質プロセスまでを考慮して持続可能な土地利

用および環境保全を可能とするための具体的な方法論」を「応用地生態学」と定義し、その基本概念および手法の構築を行った。

2. 研究方法

まず、地生態学の流れや、地形地質と生態系の関連性について文献調査やアンケートを行い、「応用地生態学」の基本概念と現状を整理した。次に、生態系保全のための地盤調査のツールならびに現地調査手法等の開発を行い、これらを行っていくつかのモデルフィールドにおいて地盤環境と生態系の関連性の調査を実施した。最後に、応用地生態学の諸技術について「生態系保全のための地盤の調査と対策」をとりまとめた。

3. 研究結果

3.1 地生態学の概要と応用地生態学の位置づけ

ここでは地生態学の概要について時代を追ってレビューし、応用地生態学の位置づけを明らかにする。なお、詳細については、横山^{3),5)}などに詳しい。

1) 景観生態学の発生

景観生態学および地生態学の創始者はドイツの地理学者 Carl Troll である^{3),5)}。彼は1938年に「空中写真と大地の生態学的研究」を発表し、景観の生態的関係を熟知していれば空中写真で見られる植生や地形から、土壌や地下の状態、人間の関与の程度などを推察することができるとした。これをもとに1939年に初めて景観生態学を科学的用語として使用した。Trollの考えた景観生態学(地生態学)とは、「生物と環境要素との間の総合的・複合的相互関係の科学」⁶⁾である。

2) 景観生態学と地生態学の分化

1968年にTrollは「景観生態学」を「地生態学」に改めた。このことから明らかなように、元来、地生態学と景観生態学は同一のものである。しかし、両者はやや異なる用いられ方をするようになり、現在でも混乱が見られる。例えば地理学を母体とする分野では「地生態学」が主に用いられているが、生態学や造園等の分野では「景観生態学」のみが一般的となっている。

Troll 門下で今日の景観生態学研究の第一人者である Leser によると⁷⁾、地形地質空間は、気候・水文空間を含めて「ゲオトープ」、その機能を「ゲオシステム」としてとらえられており、ゲオトープとゲオシステムを含めた専門領域を扱う分野を「地生態学」と表現した。しかしこの区分では、地生態学は無機質な部分のみを対象とするようにも見え、現在行われている地生態学の実態と異なっている。

日本では「landscape」(景観)の和訳に対しても様々な考えがあり、「景域生態学」⁸⁾、「地域の生態学」⁹⁾、「景相生態学」¹⁰⁾、などと訳す研究者もいる。以上のように Troll の危惧は的中し「地生態学」への統一は失敗した。

3) 地生態学の発展

Troll の唱えた景観生態学や地生態学は、1960年代から西ドイツを中心に自然地理学の分野で発展した。西ドイツでは生態的に同質な小単位である「エコトープ」の分布を示す「地生態学図」が盛んに作られた¹¹⁾。

日本でも1950年代に地生態学は紹介された¹²⁾が、本格的な研究は小泉²⁾により、Troll の流れとは別に日本の山岳研究の系譜の中で独自に、いわば「土着的」¹³⁾に開始された。

1970年代には Leser が景観生態学のはじめての教科書といえる「景観生態学」¹⁴⁾を著した。同時期にアメリカ合衆国でも、Ives を中心とするコロラド大学のグループが高地の地生態学を中心として研究の勢いを増した。Ives らの研究は1980年代以降は人文社会現象も対象とするようになった。Ives の流れを組む渡辺は Ives らの研究を「広義の地生態学」と呼んだ¹⁵⁾。

4) 地生態学の確立と応用

1980年代以降は、1981年に国際景観生態学会が設立されるなど、景観生態学や地生態学的な研究は急増した。1994年には日本でも国際景観生態学会日本支部が発足したり大学に地生態学の講座が作られるなど、景観生態学・地生態学的な研究が広く認められるよう

になった。

また、1990年代以降は、純粋な地生態学だけでなく応用地生態学的な研究が見られるようになった。例えば松井・竹内・田村⁴⁾は、主として多摩ニュータウンの建設に関連する丘陵地の応用地生態学的な研究事例を紹介している。また農学、緑地学、造園学の分野では武内⁹⁾などが先駆けとなり精力的に地生態学的な考えを活用している。土木分野においても、1997年に応用生態工学研究会が発足し、生態学を考慮した土木工学が発展し始めた。この環境の中で、とくに河川計画や砂防などの地表の環境変動が激しい空間領域を対象とする土木分野において、地生態学や景観生態学的な視点を土木に活用する動きが活発化した(例えば太田・高橋¹⁶⁾、玉井・奥田・中村¹⁷⁾)。最近は、霞ヶ浦など、湖沼や湿地の保全にも地生態学・景観生態学が活用されている。また、地盤工学と生態系の関係に関する啓蒙書なども出版されるようになり(例えば地盤工学会生態系読本編集委員会編¹⁸⁾)、地盤工学と地生態学や景観生態学の接近がみられる。

ところで小泉¹¹⁾は、後に渡辺¹⁵⁾が「広義の地生態学」と呼んだ Ives らの研究に対して、「アイブスらの研究はもはや従来の地生態学の枠におさまるものではなく、『応用地生態学』の段階まで達したと考えてよいであろう」(傍点筆者)と述べている。この「応用地生態学」という用語は、筆者が知る限り小泉がはじめて用いたが、近年までこの用語が他の研究者に引用された様子はなかった。佐々木¹⁹⁾は「応用地生態学」を「静的な地形地質場のみならず動的な地形地質プロセスまでを考慮して持続可能な土地利用および環境保全を可能とするための具体的な方法論」と定義したが、佐々木も当時、「応用地生態学」を自身の造語と考えており、小泉¹¹⁾の「応用地生態学」の記述に気づいていなかった。しかし最近、大学の地生態学の講義の中に「応用地生態学」の用語を用いているところもある。また最近、応用地生態学という用語こそ用いていないものの、応用地質学や地盤工学の分野で類似の概念の提言が同時発生的に見られるようになってきた(例えば、大野²⁰⁾、笠原²¹⁾など)。ある意味で、「応用地生態学」的な学問や概念が必要とされる社会環境になったといえる。これに関連して、横山⁵⁾によると、1999年には「応用景観生態学」が Leser 生誕60年記念誌として出版された。

以上のように現在では、純粋な地生態学や景観生態学とともに、その応用学が連動して発展する芽吹きが

見られる。これは、単に環境保全にとどまらず、持続的な土地利用を目的とした科学的土地利用論の体系化を図る動きの一部とみなすことができる。

3.2 地形地質と生態系の相互関係

1) 地形地質と生物の関係概念図

地形や地質と生態系の相互関係について、いくつかの地生態学者による概念を比較した。このような概念の違いは、地生態学者やその流派の考え方を表している。

まず、前述した Leser⁷⁾は、地形や地質といった地因子と動物や植物といった生物因子を対極として間に人的因子を置き、それらを「空間」と「機能」という視点から分類している。Finke²²⁾は、それぞれの因子が相互に関係するものとして表現している。また、Leser¹⁴⁾は、特に地形に関して景観生態学的機能として非常に細かな相互関係の図を示している。

これらに対して小泉²³⁾は、山地の自然システムと各要素のかかわりを、時間軸を重要な視点として示している。これはヨーロッパ風の地生態学の研究方法が主として地形や地質などの空間の静的な重ね合わせによるのに対し、小泉は生態系の成立を解明するには静的な重ね合わせではなく動的な時間の流れの結果として解釈しなければならないと考えているためであろう。また、菊池²⁴⁾も地形因子が植生に作用する2つの経路を、「形態」とともに「プロセス」を重視した形で模式化している。

以上を整理すると、「空間（形態）」・「時間（プロセス）」・「機能（相互関係）」という3つの視点を取り込んで地盤と生態系の関連性を捉えることが重要と考えられる。

2) 文献にみる地形地質と生物の関係

次に、地形地質と生物の具体的な関係性を総覧するため、生態学・地生態学・景観生態学・地理学・地形学・地質学などの分野において、地形や地質と植生の関係が述べられている145文献を収集し、関係性を概括した²⁵⁾。

図-1は、文献中の記述をもとに、地形、地質、土壌（土質）、水環境、気

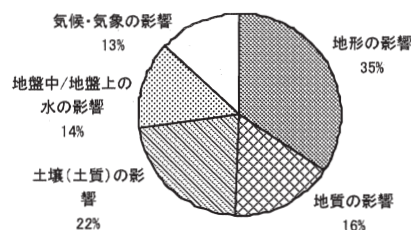


図-1 収集文献に対する各要素の割合²⁵⁾

象条件の各要素のうち生物と関連性の高い要素(以降、主要素と称する)となっていると評価される割合を整理した(文献の重複あり)。これをみると、いずれの要素も相応に関連性が高いと考えられており、主要素たり得ることがわかる。したがって生態系の調査においては、これらの要素に関する調査は必須であると理解できる。

このうち、地形や地質を主要素とする文献について、対象とする地形場をみると(図-2)、高山・山地・丘陵地などの文献が多い。特に高山の研究が多いことについては、人工的な擾乱が少なく関連性を見だしやすいこと、高山は地理学の発展においてとりわけ重要な研究対象であったこと、環境保全の関係からも高山は貴重種等が多く重要であること、などが原因であろう。しかし逆に言えば、人間が日々暮らしている丘陵地・台地・低地などについては、あまり研究がなされていないことを示している。今後はこのような人間生

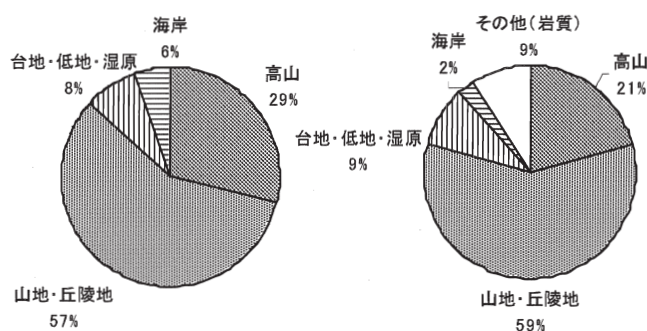


図-2 地形要素を主要素とする文献(n=90) (左)と地質要素を主要素とする文献(n=43) (右)における記載されている地形の割合²⁵⁾

活の場に近い地形場における地生態学研究が必要である。

また、図には示していないが、地形要素のうち、大～中地形（高山、火山、丘陵、段丘、扇状地、などの比較的大きな広がりを持つ地形区分）に依存する生態系と、微地形（尾根頂部、崩壊地、谷頭斜面、崖錐斜面、湿地中の凹凸、といった小規模な地形区分）に依存する生態系の、文献における割合を見ると、微地形に依存する生態系を扱った文献が8割を占めている。微地形は土壤水分の違いや土壤の厚さなどにも関係していると考えられる。このことから、生態系のための調査においては、大～中地形だけでなく、微地形の情報を正確に取得する必要があることがわかる。なお、この文献調査では工学分野の文献を収集していない関係上、人工環境（切土・盛土斜面、農地、採石場跡地など）に関する文献がなかったが、緑化学などでは多くの研究がなされている。人工改変による環境影響や自然再生などを考える上では、人工環境における生態系も重要であり、今後は地生態的視点での人工環境の研究も必要である。

次に地質要素、特に岩の性質に関して詳しく見ると（図-3）、意外なことに、従来、石灰岩植生や蛇紋岩植生などによってよく知られている「岩の化学特性」よりもむしろ、「岩の力学特性」や「岩の構造」に依存する生態系に関する文献が多く見られる。とりわけ、岩の風化特性（岩塊化・土砂化・土壌化などのしやすさ）、岩盤中の弱面や弱層（断層や亀裂の分布特性や分布密度など）が植生に影響する事例が見られた。岩の化学特性は岩石の種類からおおむね把握できるが、岩の力学特性や岩の構造については、通常地質図からは把握できない。この点に関し、一般に、応用地質学図（とりわけ土木地質図）においては、このような情報も記載されている。このことは、生態系に関わる調査においては、既存地質図の活用だけでなく、応用地質学（地質工学）的な調査やそれを表現した応用地質学図の作成が必要であることを意味している。ただし、生態系を対象とした応用地質学図は地表面付近1m程度以内の性状を詳細に記載する必要があるため、主に地表下数m以深を対象とした土木地質図とは異なる記載内容・記載スタイルが必要であろう。

土壤（土質）については（図-4）、土の粒度や化学特性が重要と考えている文献がともに42%で多い。また、着目すべき点として、土の挙動（クリープ、土砂の浸食・移動・堆積など）に依存する生態系の存在がある。このことは、生態系に関わる調査においては、

通常の土壤（土質）調査だけではなく、斜面や土層の安定性に関わる調査と評価が必要であることを示している。このためにもまずは地形学的な調査が重要となるだろう。

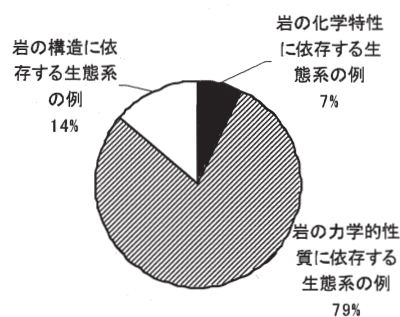


図-3 地質要素における関連性の原因の割合 (n=43)²⁵⁾

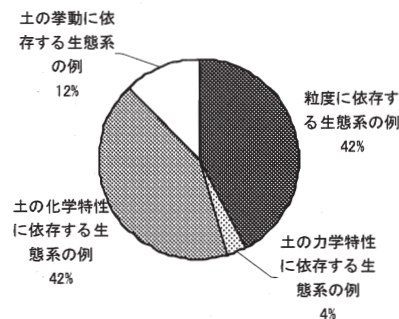


図-4 土壤（土質）要素における関連性の原因の割合 (n=55)²⁵⁾

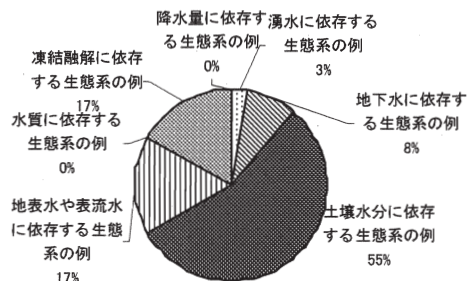


図-5 地盤の水の影響での関連性の原因の割合 (n=36)²⁵⁾

地盤中/地盤上の水(図-5)に関しては、土壤水分に関するものが過半数を占める。したがって生態系の調査において土壤水分の把握は非常に重要である。土壤水分は、気象、土質のほか、地面の方位、地形、地質、地下水や湧水の分布などにより影響を受けるため、場所(と時間)により大きく異なると考えられる。しかし現在のところ、土壤水分を面的かつ迅速に調査できる手法は存在しない。当面は、限られた土壤水分実測値と、地形・土質・地質・湧水・地下水データなどをもとに、土壤水分分布推定図のようなものを作成する技術が必要である。また、長期的には、リモートセンシングなどから土壤水分分布を面的・時間的に推定する手法の開発が必要である。

3.3 応用地生態学の基本概念

地形地質と生態系に関する既存の概念図や文献などから整理すると、地形地質環境の捉え方については2つの考え方がある。

一つは、静的な環境として捉える考え方である。その場合、地形地質環境に関する情報は生態系理解の補助として単に静的な自然構成要素の一つとしてのみ用いられる。このような手法は不十分ながら既に環境調査で行われている。例えば、

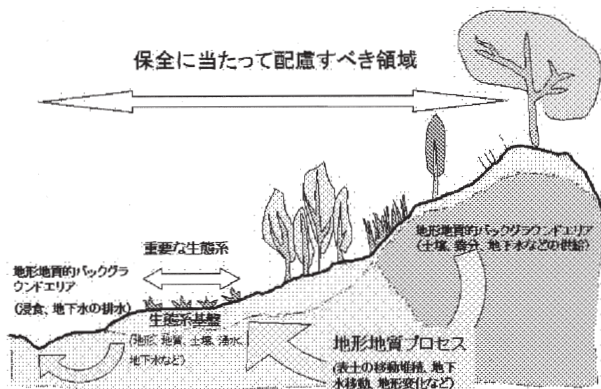


図-6 応用地生態学の基本概念

表-1 応用地生態学において必要とされる技術の例

大分類	分野	開発課題と具体技術の一例	
調査	①微地形調査技術	・微地形の測定精度向上や効率化 (レーザープロファイラ等) ・踏査時の位置把握の精度向上や効率化 (GPSや高精度高度計の活用等)	
	②表層地質土質調査技術	・地質試料採取の効率化 (簡易連続長バソイルサンブラー等) ・表層地質構造の調査精度向上や効率化 (土層深層簡易測定技術、極浅部地質構造探査技術等) ・物理化学特性の調査精度向上や効率化 (土質物理化学特性連続測定プローブ等)	
	③地下水や土壌水の調査技術	・採水孔、観測孔の創孔の効率化 (簡易観測孔創孔技術等) ・地下水等の採取精度向上や効率化 (簡易採水技術、微小領域採水技術等) ・地下水位や土壌水分の測定技術の向上 (極浅部簡易多点水分測定技術等) ・地下水流動等の調査精度向上や効率化 (地下水流動探査技術、土壌水流動孔内観測技術等) ・地下水や土壌水の水質測定技術の向上 (地下水質連続測定プローブ、土壌水質経時的自動観測技術、地下空気成分測定技術等)	
予測	①基盤環境変化予測技術	・地下水等のシミュレーション技術 (地下水や土壌水の不飽和流動シミュレーション、地下水流動と水質の連成シミュレーション等) ・地形改変による基盤環境変化シミュレーション技術 (地形改変による日照・風・降雨積雪残雪・地表温度・土壌水分等の変化シミュレーション等)	
	②生態系への影響予測技術	・地形地質と生態系の関連性の解析技術 (生態学的な関連性解析、GISによる生態系の基盤環境依存性の定量解析、等) ・基盤環境変化による生態系への影響予測評価技術 (生態学的な影響予測とシミュレーションを統合した影響評価技術等)	
対策	回復	・影響域の決定技術	
	低減	・地下水の保全技術	・地下水制御技術 (地下水供給源保全技術、地下水止水技術、地下水通水技術、地下水導水技術、土壌水分制御技術等)
		・改変箇所の近自然化技術	・切土のり面の近自然化技術 (周辺山地形状と調和したのり面形状の設計技術、周辺の地質土層状況と調和したのり面表層の近自然化技術、切土前の基盤環境機能の復元技術等)
	・地形改変の最小化技術	・切土のり面の最小化技術 (急勾配化によるのり面最小化技術、自然斜面や切土のり面表層の補強安定化技術等)	

「地形の勾配」、「微地形の分類」、「土壌の種類」などはGIS上でメッシュないしポリゴンデータにしばしば表現され、生態系の成立条件の解析や保全・復元すべき地域の決定のための解析に活用されている。これは前述のようにヨーロッパの地生態学の流れをくむ方法である。しかしこのような手法の中には真の意味での地球科学的な視点は含まれていない。

もう一つは、動的な環境として捉える考え方である。例えば、斜面の表土は不変のものではなく、風化、浸食、堆積、雨水の浸透などのプロセスの中で現在の土壤環境が形成・維持されている。すなわち、現在の地形地質環境は、動的な地形地質プロセスの中で存在する一つの動的平衡状態とみなせる。この視点から見ると、持続的な土地利用は、「生態系そのもの」の保全はもとより、静的な「生態系の維持基盤としての地形地質環境」、さらに動的な「維持基盤を存在せしめている

地形地質プロセス」を中長期的視野で保全することなしには実現しない。これが応用地生態学的な環境保全の基本概念である(図-6)。

例えば、蛇紋岩地植生のようにある岩質や土質に特有の植生の保全においては、その植生の地域の保全だけでなく、その土壌の元となる土砂を供給した背後斜面の特定の地質基盤の環境も含めて保全したり、谷頭斜面などにおいて特定の土壌や水分状態に依存する貴重種が分布する場合、その場所だけでなく、背後斜面にある、土壌や地下水を適度に集積させる場と機能の保全、すなわち「地形地質プロセスの保全」が必要である。この場合、「どこまでの地形地質プロセスを保全すべきか」という議論が発生するだろうが、これは一義的に決定できるものではなく、むしろ「生態系をいつまで、どの程度保全したいのか」を問い直し、それを明確にした上で決定すべきものである。いずれにしても地形地質プロセスの保全を意識するとしないでは環境保全の長期的な効果という点で大きな違いがある。

次に具体的な手順について考える。まず、貴重な生態系を存続せしめている主な影響範囲を仮に「地形地質プロセスユニット」と定義する。このユニットが重点的に保全すべき範囲である。この範囲は必ずしも貴重な生態系の分布範囲とは一致せず、一般には後背地を含めたやや広いエリアとなる。しかしこれにより無意味に保全地域を拡大する必要もなく科学的に保全範囲を設定できるようになる。具体的には、生態系を存在せしめている「土壌」、「地表水ならびに地下水」、「地形」、「地質」について、「現在の分布及び性状(地形地質環境)」、「地形地質環境を形成しているプロセス」、「地形地質環境の形成に主たる影響を及ぼしているバックグラウンドエリア」を系統的に明らかにし、バックグラウンドエリア(またはその機能)までの保全や復元を図るのが基本的な手順であろう。

ところで、地生態学は地理学の一分野として発達してきたが、これまで述べたように地質や地下水なども含めた視点が必要とされることから、地質学的視点も重要である。とりわけ、応用地質学がその発展に強く貢献しなければならない。応用地質学とは、地質学を資源利用や土地利用などに応用する学問分野であり、資源地質学として発展し、土木地質学として成熟した。近年は資源開発などの負の面を補うように環境地質学が発展し、地下水保全などに貢献しているほか、土木開発などの負の面を補うように防災地質学もその重要性を増している。今後は、資源地質学・土木地質学・環境地質学や防災地質学に続く流れとして、応用

地生態学を発展させるべき時に来ていると考えられる。

3.4 応用地生態学の検討課題

現状の応用地生態学の検討課題を以下のように整理した。

1) 地生態学そのものの進展

地生態学は急速に発展しつつあるとはいえ、地生態学に関わっている研究者自体はいまだ少ない。また研究対象もこれまでは高山などの比較的自然環境がよく残ったエリアを主体にしていることが多い。しかし今後は、里山、農村、郊外、都市など、人間活動が関わりやすい丘陵～低地エリアでの地生態学が必要である。このようなエリアでは、単に今ある環境を保全するだけでなく、環境を評価する技術、自然の復元力を借りながらより良い環境を再構成するための技術、そして持続可能な土地利用を行うための総合技術が必要となり、それにはこのようなエリアでの地生態学とその応用が不可欠である。かつて地下水・金属・石炭・石油などの地下資源を求めるといった切実かつ実務的なニーズが純粋地質学を醸成したように、良好な環境を求めるといった切実なニーズをもって地生態学そのものを発展させる必要がある。

2) 地形地質環境の調査手法の開発

生態系にかかわる地形や地質は、土木分野において扱ってきた地形や地質よりもさらに微小な地形・地質であることが多く、またさまざまな地形地質的要素が相互に作用した総体として捉える必要もある。例えば、石灰岩地域を例にとると、石灰岩の中にはさまざまな岩質(化学組成、亀裂、空隙率、透水性、風化や変質など)や地質構造、また溶食構造があり、地形も通常の微地形のほかにもさまざまな溶食地形がある。土壌は風化、斜面変動、浸食、堆積、植生、土壌生物などの影響を受けて複雑に変化する。土壌水分も土質だけでなく微地形による局所的な気候条件の影響を受ける。湧水は微地形や溶食された岩盤中の水みちなどの影響を受けて複雑に発生する。その水質も基盤岩や土壌などの浸透経路や浸透時間などの影響を受ける。生態系はこのような複雑多様な環境要素からなる空間の中で成立しているため、地形地質環境の調査手法も、これまでよりも詳細で面的な調査技術が要求されるはずである。場合によってはこれまでと全く異なる地盤特性を調査する技術も必要とされる可能性もある。

表-1は、必要とされる応用地生態学技術の例である。このようにさまざまな調査技術が必要となる可能性がある。どの程度の精度を持つどのような調査技術が必要であるかは、生態学や地生態学との共同作業の

中で整理・開発していく必要がある。

3) 地形地質環境の生態系への影響評価手法の開発

応用地生態学は土地利用による生態系への影響を評価し、土地利用を科学的かつ客観的に計画できるように支援する技術である必要がある。つまり地形地質環境およびその変化が生態系に与える影響を適切に評価できるものでなければならない。また、地質学における「地質図」、地生態学における「地生態学図」と同様に、重要な地形地質プロセス（バックグラウンドエリア）を明確にした「応用地生態学図」を作成し、守る領域と利用する領域の設定根拠を第三者に的確に伝達する技術も必要である。このためには、地生態学的な知見をもとにした地盤環境評価のロジックの形成、さらに地下水等のシミュレーション技術などを用いて長期的な地盤環境の変化やそれによる生態系への影響を推定する手法などについても充実していく必要がある。

4) 対策工の選定法や設計手法の開発

地形地質場や地形地質プロセスに応じた対策工の選定手法あるいは設計手法の開発も重要な課題である。本研究において、土木事業者へ生態系保全対策に関して地盤の要素をどの程度考慮したかアンケートを行った²⁶⁾。この結果、生態系保全対策の検討事例において、地形地質を考慮した対策を採用している例は非常に乏しく、わずかに、地下水の保全に配慮した工法や、切土のり面の勾配を最小に押さえる工法を採用した例などが見られるのみであった（たとえば日光宇都宮道路）。例えば道路の切土のり面一つとっても、周辺の山地環境になるべく負荷を与えないようにするために、急勾配にして改変面積を最小限にすればいいのか、それとも改変面積が多少大きくなっても周辺の山地に調和した勾配・形状・被覆状態のり面環境を造成すべきかが課題となる。このような場合、周辺の山地環境の希少性、脆弱性や自然復元のしやすさ、あるいはそれぞれの設計法による貴重な生態系の成立要因への影響度（例えば日照、風、地下水位等の変化による土壌水分の変化など）を判断して対策工を選定する手法を開発する必要がある。保全対策は、より多様な選択肢があるべきであり、その対策の選定・設計も科学的に行われるべきである。

5) 対策工の開発

地形地質プロセスが維持されるような環境対策工そのものを開発することも重要である。例えば地下水流路の復元技術やのり面の近自然化技術などが挙げられる。このような対策工は、それ自体が長期間に周辺の自然の構成物に返っていくようなものであることが望

ましい。

6) 行政システムへの適用

上記のような要素技術を組み合わせることで技術を体系化するとともに、行政的なシステムに組み込んでいくことが重要である。例えば環境影響評価法では一般に、事業者が標準的な手法をマニュアル化している（例えば道路環境研究所編²⁷⁾）。応用地生態学を体系化したうえで、このようなマニュアルの中に地生態学的な手法や応用地生態学的な手法を組み込むことが必要である。

3.5 応用地生態学的調査技術の開発

以上をふまえ、茨城県、滋賀県など、いくつかのテストフィールドにおいて、地生態学及び応用地生態学的な調査手法の開発に関する検討を行った。ここでは、一例として、茨城県の事例を示す。

調査は茨城県の筑波山の北方に広がる標高 200～300m 程度の里山を主体に行っている。里山を選定したのは、一般に湿地や水辺に比べ山地環境の保全手法の開発は立ち後れていること、山地では平地に比べ地形地質プロセスが盛んであること、里山では土木開発などの土地利用が盛んに行われていることなどによる。調査地は花崗岩およびその風化したマサからなり、山頂や山腹の一部には表層に関東ロームが堆積している。地形は緩やかな山頂緩斜面に続き 30～45° 程度の急な勾配を持つ山腹や谷頭斜面、また斜面下部には山麓部緩斜面、湧水地、溪流などがある。このような地形地質性状は、日本全国に普遍的に存在する里山の地盤環境の一つであろう。

1) 微地形調査技術の活用

地形地質環境を詳細に把握するためには、調査の基図となる地形図が不可欠である。また、詳細な地形図からのさまざまな情報（微地形、斜面勾配、斜面方位など）はそれだけで環境調査の重要なデータになる。環境アセスメントなどでは一般に既存の地形図（多くは航測地形図）が用いられている。しかし航測地形図は精度が不十分であり、しかし実測地形図は手間がかかり高価な割には細かな微地形が十分把握できないという問題点があった。そこで微地形を迅速かつ詳細に把握する手法としてレーザープロファイラ（航空レーザー測量）²⁸⁾の活用の可能性を検討した。レーザープロファイラは、図-7上図に示すように、航空機やヘリコプターから地表に向けて高速でレーザーパルス照射し、その反射までの時間から地形の形状を測量するものである。また、パルスの選択により、樹木等の高さを計測することもできる（図-7中図）。図-7下図は、

調査フィールドにおける同一箇所の航空レーザー測量で、一方は植生の繁茂期(夏季)、他方は落葉期(冬季)の測量ポイントデータ(上)ならびにそれから作成した等高線データである。植生の繁茂期には測量ポイントデータも少なく落葉期には非常に良質の等高線データが取得されている。

このレーザープロファイラによって冬季にデータを

取得し、空中写真判読(解析図化機は用いず実体視のみによる判読)や現地踏査を行い、調査箇所の地形状況を確認したところ(調査結果は図-9)、空中写真判読や現地踏査によると、調査地の地形は山頂の緩い斜面、山頂から山腹へ遷移する中傾斜の斜面、山腹の急斜面、谷頭斜面、尾根斜面、山麓緩斜面、溪流などで構成される(これらをここでは便宜的に微地形とよぶ)。

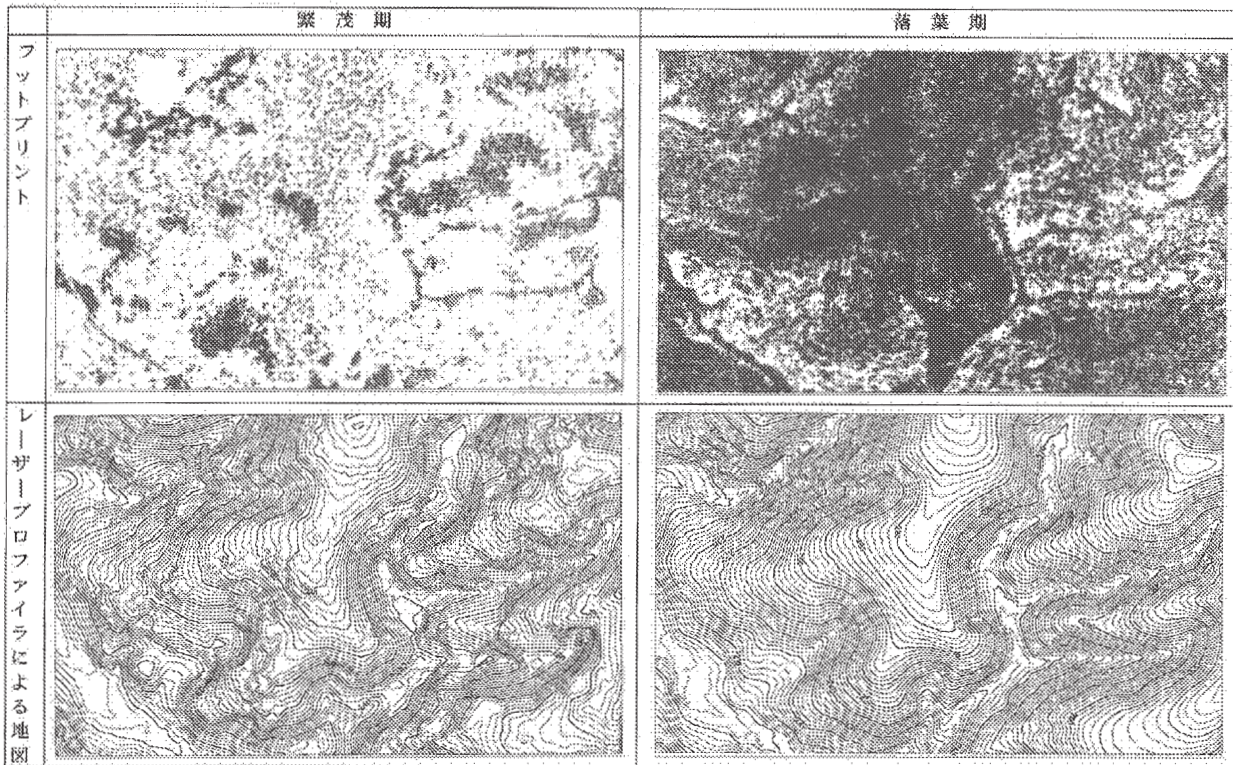
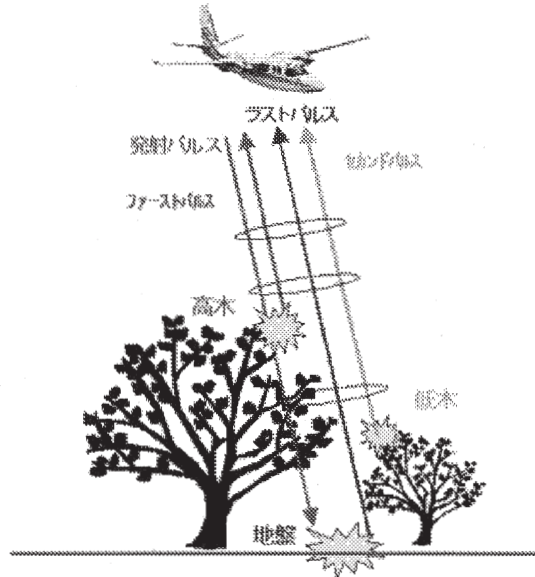
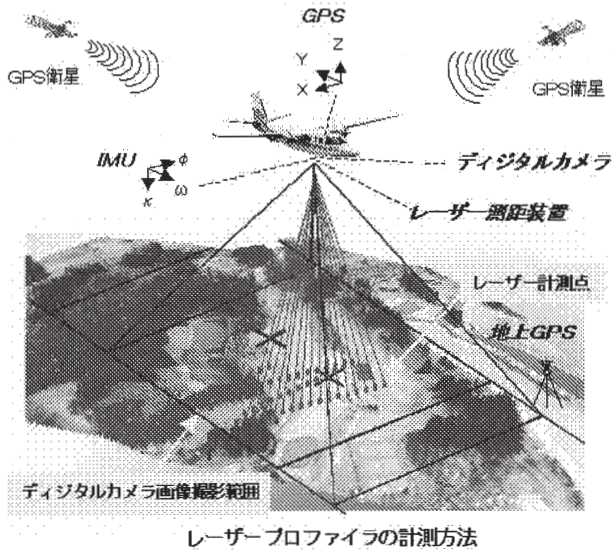


図-7 レーザープロファイラの原理(上図、中図)と測定結果(下図: 同一箇所の夏(下図左)と冬(下図右)の航空レーザー測量結果の相違(上の緑の点が測定ポイント、下が作成された地形図。落葉した冬季の方が測定ポイントが格段に多く、高精度の地形図が作成された。)

また、とくに現地踏査によると、単一の微地形内にも起伏1～2m以内・波長10m以内のさらに細かい微地形（ここでは便宜的に極微地形と呼ぶ）が見られる。例えば、山腹の急斜面内の場合、上部付近に小崩壊などによると思われる微小な段差地形が複数段見られる箇所がある。また谷頭斜面では表層クリープによると見られる表土のアンジュレーションが確認される。なお、同じ種類の微地形でもその規模により特性が異なっている。例えば谷頭斜面の場合、①小崩壊跡地（崩壊に起因する凹地があるがその下位に溪流斜面を伴わない）、②小崩壊跡地が発達したと思われる微小谷頭斜面（溪流斜面を伴うが谷頭斜面の頭部が山腹急斜面内にとどまっている）、③発達した小谷頭斜面（谷頭斜面の頭部が山頂緩斜面付近に達している）、など多様であり、その内部の極微地形も、崩壊跡地から谷頭斜面に発達するにたがってアンジュレーションや段差地形が複雑に発達するようになる。踏査によるとこのような極微地形によって植生も変化することが確認できる。例えば調査地内で最も大きな谷頭斜面の中央部は、表層クリープによりロームが厚く集積しアンジュレーションも発達した谷頭凹地上部と、その直下の崩壊により表土の薄い谷頭凹地下部に分かれるが、前者のエリアでは土壌は比較的乾燥しており広葉樹が発達し下草が乏しいのに対し、後者のエリアでは土壌が湿潤で灌木が多くアオキやアズマネザサが密に繁茂している。すなわち地形プロセスが上部と下部で異なり、土壌や土壌水分の差を生じ、それが植生の差に現れているとみることができる。

空中写真判読、航空レーザー測量、現地踏査の比較の結果、通常空中写真判読では谷頭地形等は判読できるが、主として植生の影響により、細部の微地形判読（深さ1～2m未満の規模の崩壊跡地など）は判読不可能であった。一方、レーザー測量の結果と現地踏査の結果はある程度の整合性があり、深さ1～2m以上の規模の崩壊跡地などは航空レーザー測量でも把握可能であることがわかった。

このことから、航空レーザー測量による地形図は応用地生態学的な調査の基図として強力なツールかつデータになることがわかった。

しかし、土壌の細かな変化と関連のあるようなさらに微細な極微地形（小規模な崩壊跡地や地表の1m内外の微細なアンジュレーションなど）に対しては、レーザー測量でも十分捉えきれない箇所があり、現地踏査が最も有効であった。このような極微地形が植生に關与している場合は、現地踏査による確認が特に重要

であることがわかった。

2) 土壌環境の調査ツールの開発

山地領域では地形が複雑で、それに伴い土層深や土質も変化する可能性がある。したがって土壌の空間分布と土壌生成プロセス、およびこれらと生態系の関連性の把握が重要であるが、土壌の迅速な調査法がないのが課題であった。そこで土壌環境の調査ツールとして、まず、土壌の強度や土層深の調査ツール（土層強度検査棒、重さ約4kg）を開発した（図8）。土壌の調査法としてはこれまで、検土杖や斜面調査用簡易貫入試験機（または土研式簡易貫入試験機）が知られているが、検土杖は深さ1.5mまでの比較的軟質の表層土

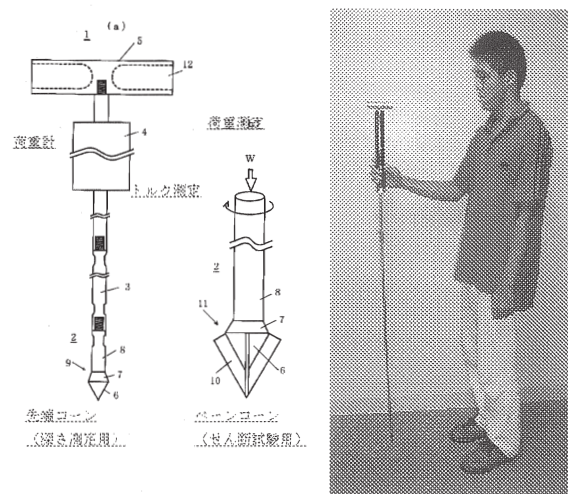


図-8 土層強度検査棒の構造と外観

壤の確認しかできず、一方斜面調査用簡易貫入試験機は、4～5m程度の深度まで調査できるが1箇所測定に30分～1時間程度要し、かつ重く（約16kg）、作業に最低2人を要するという欠点があった。生態系に関連する土壌を面的に調査するには「迅速」かつ少なくとも根系の下端部に達する程度の深度・硬度までの調査法である必要がある。そこで、同図のようなサイズ・形状とした。なお、図にはないが、先端コーンを羽根付きのものに交換することで土壌の粘着力と内部摩擦角を測定することもでき、また先端コーンのかわりに細いサンプラーを取り付けることも可能である。この器具を用いて試験山地で調査したところ、1箇所2分程度で土層深が測定できた。また根系が発達し得る土層強度以上の硬さまで測定できること、試験時の感触から土粒子の粗さが推定できることなどもわかった。

次に、前述した航空レーザー測量による地形図を基図として、土層強度検査棒により詳細な土層深分布を測定するとともに（図-9左図）、一部測線では実際に

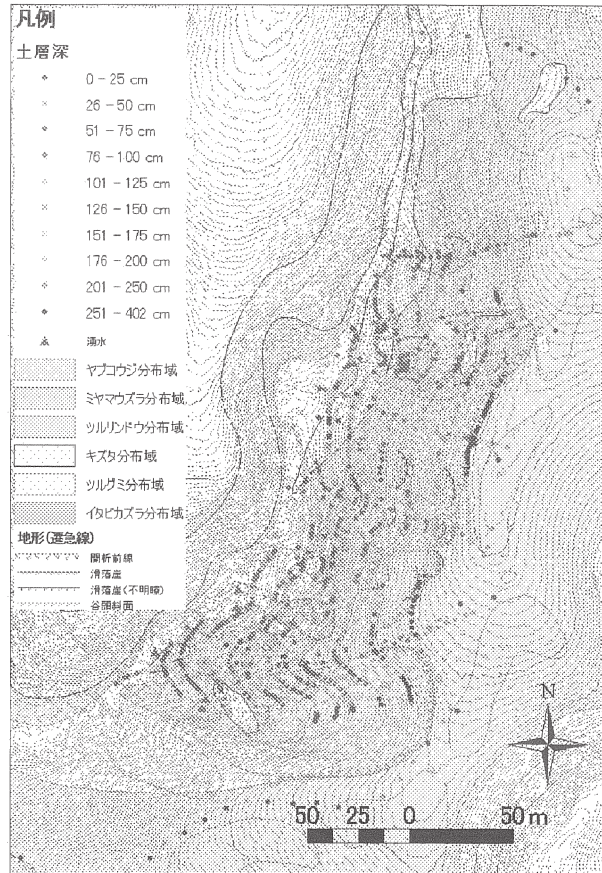
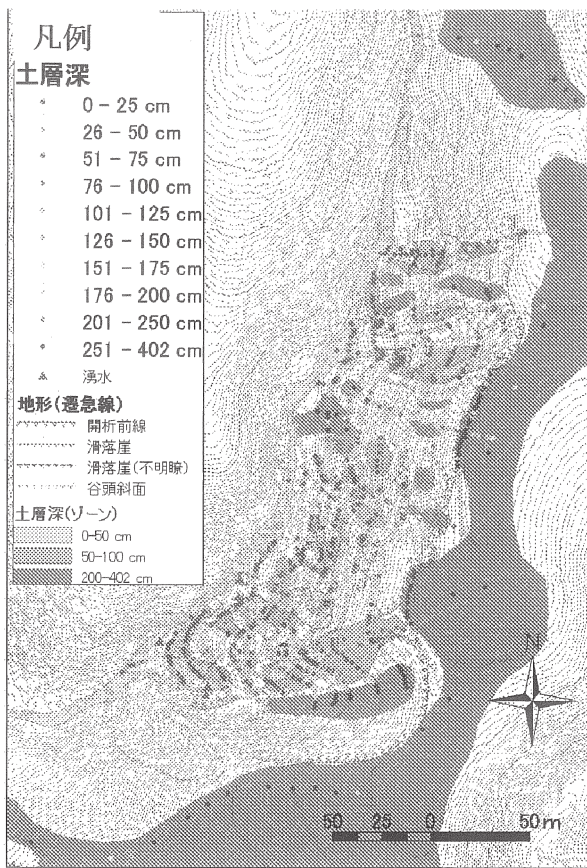


図-9 微地形と土層深分布(左)および植生(右・例としてツル科の植物)の関係

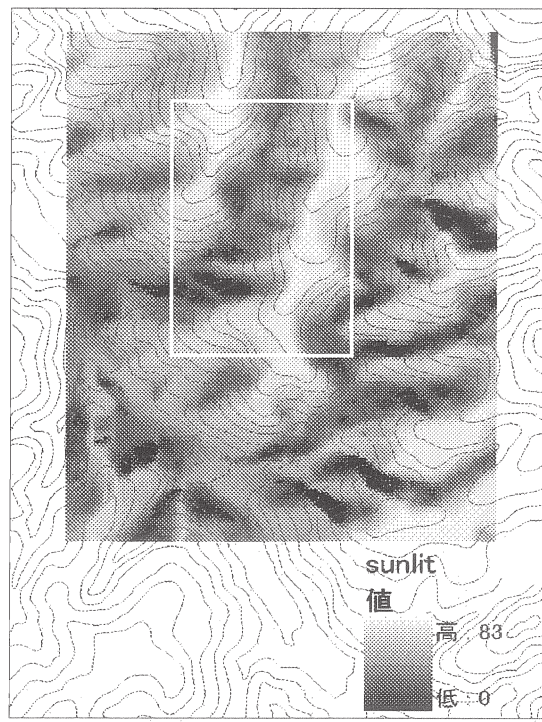
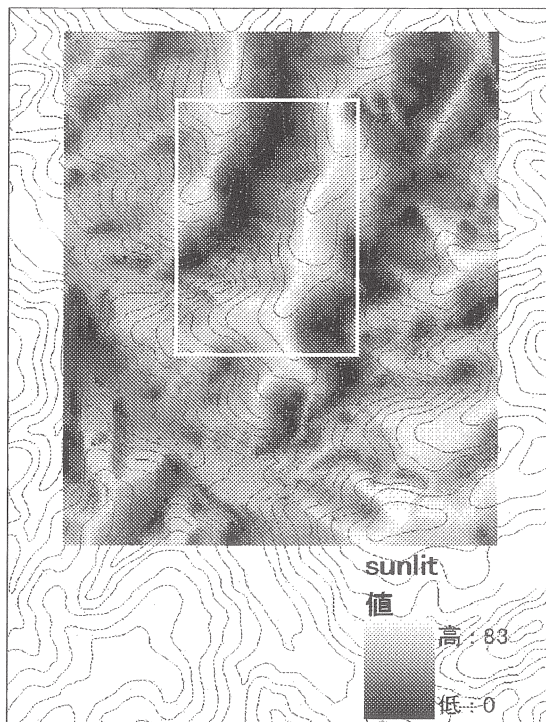


図-10 日照解析による夏至の6月21日(左:南中高度 77.2°)と10月28日(右:南中高度 40.3°)の累積日照時間(値は1単位10分、白枠は図-9の現地調査範囲)(南北に伸びる谷部は夏の日照時間が少なく東西に伸びる谷は秋~冬季の日照時間が少ない)

土壌トレンチを行い土質を確認した。調査地の基盤地質は花崗岩であり、土層強度検査棒の貫入時の感触から判断すると、表層部は腐植土やローム、深部はマサからなるが、場所によりロームが欠如していたりロームとマサが混合していたりして、土質分布は複雑であることがわかった。図-9左図によると土層深分布も複雑である。微地形と比較すると、土層分布や土層深は過去の崩壊履歴や谷地形での土層の集積作用等に影響を受けていることがわかる。筆者らは福島県や広島県の別な調査地（花崗岩）でも同様な調査を行ったが、そこでも同じような複雑な土層構造を有していた。したがって、このような複雑な土層分布は、里山や山地の斜面では普遍的に存在するものと推察することができる。このことから、里山において植生の保全や生態系の保全を検討する場合、このような複雑な基盤環境構造の存在を認識しておくことは重要である。図-9右図は、この調査地で100種ほどの植生の分布調査を行った結果の一例（つる性植物の例）である。これを見ると、尾根付近に分布するもの、尾根と谷の両方に分布するもの、谷に分布するものなど様々な種があることがわかる。ただし、この植生図では土壌分布に対応するほどの細かさで植生分布が表現されていない。この植生調査は現地を綿密に踏査して実施したものだが、微地形図や土壌分布図を作成する前に実施しているため、これらの分布特性が全く考慮されずに植生図が作成されている。そのため、土壌や極微地形と相関の高い微細な植生変化があっても、それと気づかずに調査を終えている可能性がある。したがって植生調査は、詳細な微地形調査や土壌調査を行った後に行う方が効率良く、かつはるかに精度が高い結果が得られるのではないかと推察できる。

また、図-10には、GISの日照解析による調査地域周辺の累積日照時間の計算例を示した。これによると、尾根部の日照時間は高く、谷部が低いことがわかる。このような日照時間の相違が土中温度や土壌水分の相違にも影響し、植生分布の差異に寄与していることがうかがわれる。また、日照解析によると、谷部の日照時間は、夏には南北に伸びる谷で低く、秋～冬には、東西に伸びる谷で低いことがわかる。植生調査の範囲が狭いため詳しいことは不明であるが、たとえばキツタは南北の

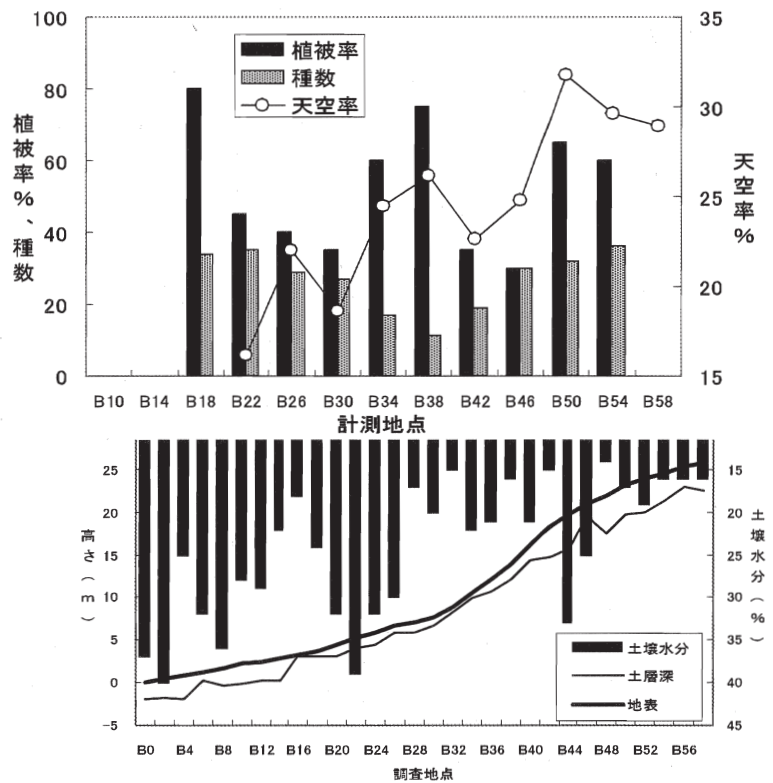
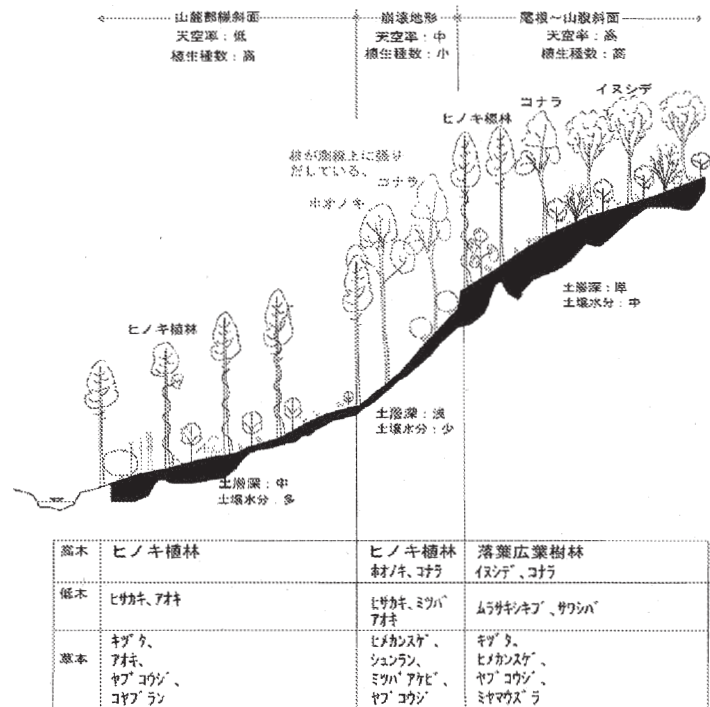


図-11 尾根から谷までのある測線における地生態断面
(上図：植生と土層深、中図：植被率・種数・天空率、下図：土壌水分²⁹⁾)

谷部が多いが東西の谷には少ないことから、このような季節による日照時間の相違が植生へ影響を及ぼしている可能性もある。いずれにしても、土壌水分や土中温度の実測データを面的に得ることは非常に困難であ

るので、このような GIS 技術も援用して、地形特性の影響を解析することが必要である。

以上のように、地形、土壌、地質等の特性について、地生態学的に考えることで、植生調査の方法など生態学的研究方法そのものに対しても貢献するものがあると考えられる。

3) 地生態断面調査法による地形地質環境と植生の比較

調査地付近の主な箇所縦断測線を設定し、地形、土壌深、土壌水分、植生などの関連性を観察した。なお、本手法を「地生態断面調査法」(geoecological profiling method)とし、本報告以外の箇所でも実施方法の検討、適用制の検証を行っている。

図-11 は、ある測線における尾根から谷までのある測線における植生、植被率、種数、天空率、土層深、土壌水分の関係の例である。この測線では斜面上部に山頂緩斜面、中腹に山腹急斜面、斜面下部に山麓部緩斜面がある。山頂緩斜面では土層深が 2 m 程度あるが、山腹急斜面では崩壊地形が認められ土層深は数 10cm 以下となり、山麓部緩斜面では再び 2 m 程度と厚くなる。土壌水分は山頂緩斜面では一般に乏しいが山腹急斜面との境界部付近で水分が高い。山腹急斜面では土壌水分は再び乏しくなるが、山麓部緩斜面では全体に高くなる。ただし山麓部緩斜面の中でも土壌水分はかなりのばらつきがある。他の側線も含め細かく見ると、調査域の「地形地質プロセスユニット」は、山頂緩斜面、山頂遷移斜面、支尾根斜面、平衡斜面、谷頭斜面(最上部、上部、中部、下部、急崖最下部)、半溪流斜面、溪流斜面、その他(鞍部直下など)、に分けられることが分かった。これに対して植生は、高木に関しては斜面下部にヒノキ植林が広がるため地形地質環境による有意な差は認められなかったが、林床植生については、図に示すように地形地質環境により差が見られた。とりわけ、土壌水分とは関連性が強いようであった。また、崩壊地形の部分では出現種数が少なく植被率が小さい傾向があった。これは斜面が急で土壌が不安定なことや土層深が浅く土壌水分が低いことなど関係があると考えられる。出現する種についてみると、例えばヤブコウジのように斜面のどの部分にも出現する種、ミヤマウズラのように斜面上部に出現する種、アオキのように斜面中下部に出現する種、キヅタのように斜面上部と下部に出現する種など、種毎に特徴がある。これらのうち、例えばアオキなどは土壌水分条件に非常に高い影響を受けているようであり、ある一定値以上の土壌水分条件で出現する傾向があったが、

地形地質条件との相関性の強さは種毎にかなり差があるように見受けられた。他の種を含め、それぞれの種がどのような地形地質条件の影響を強く受けているか確認するためには、さらに多くの測線で関連性を比較する必要がある。

このほか、他の測線とも比較すると、斜面の向きや尾根線と谷線などの違いにより、植生出現種数、植被率などに差が見られた。これらは図-10 にしめしたような日照時間によって説明できると考えられる。

以上のように、こまかな地形地質環境の違いにより、出現する植生やその様相が異なっていることが把握できた。今後、地形地質環境と生態系の関連性が定量的に把握できれば、そのような関連性の理解と、地形地質プロセスの理解などを通じて、保全すべきエリアや最適な対策手法を科学的に検討できると考えられる。たとえば、仮にアオキが貴重種である場合、一定値以上の土壌水分を維持できるように、集水地形である谷頭斜面の環境を保全することや、バックグラウンドエリアとしての背後斜面の集水機能を不飽和地下水シミュレーションで求め必要な範囲を設定することなどが提言できる。

3.6 生態系保全のための地盤の調査と対策技術の体系化

前節で開発した技術を含め、生態系保全のための地盤の調査技術、ならびに地盤環境変化が生態系に与える影響の予測評価技術、各種対策技術等を整理し、「生態系保全のための地盤の調査と対策」と題する以下のような構成の技術参考書案³⁰⁾を作成した(2006年公表予定)。

「生態系保全のための地盤の調査と対策」

はじめに

1. 地盤と生物のかかわり

1.1 生態系における地盤の重要性

1.2 文献から見た重要な地盤環境とその機能

2. 生態系保全に係わる法令と対策の現状

2.1 生態系保全に関わる法令等における生態系と地盤の位置づけ

2.2 生態系の保全対策の検討

3. 地盤と生物の関連性の調査

3.1 調査から対策までの流れ

3.2 気象の調査技術

3.3 地盤環境の調査技術

3.4 生物の調査技術

3.5 生態系と地盤の関連性の調査技術

4. 生態系への影響予測と評価

4.1 予測技術

4.2 評価技術

5. 地盤の環境保全対策技術

5.1 建設・開発事業における環境保全対策技術

5.2 環境保全対策技術の要素技術

6. 事後調査の方法

6.1 生物関係

6.2 地盤関係

7. 事例

8. 今後の課題と展望

巻末資料

4. まとめ

本研究成果は以下のようにまとめられる。

- 1) 地盤の視点から生態系保全を行う新しい工学体系として、応用地生態学の基本概念を整理した。
- 2) 文献調査により地盤と生態系の関連性を整理し、地盤のどのような項目に着目すべきかを明らかにした。
- 3) 応用地生態学的な新しい調査技術として、レーザー測定の適用性検討、土壌調査技術の開発、地生態断面調査法の開発等を行い、現地に適用した。
- 4) 上記の結果から、生態系において着目すべき重要な要素として、地形（微地形も含め）、土壌の種類や性状、土壌水分、土層の厚さ、土層の中長期的な変動、浅層の地質性状（風化・亀裂などの物理工学性状と化学性状の両面）、などがあげられる。
- 5) 生態系保全のための上記のような地盤性状の調査技術と対策技術を体系化しとりまとめた。

謝辞

本研究の実施にあたっては、土木研究所の共同研究「地形地質的視点に基づく生態系への環境影響の予測・軽減技術に関する共同研究」の共同研究者（土木研究所のほか長崎大学、(株)荒谷建設コンサルタント、応用地質(株)、(株)環境地質、(株)応用生物、(株)建設技術研究所、(株)建設技術地質環境、住鋺コンサルタント(株)、総合科学(株)、日特建設(株)）との議論が参考になった。記して感謝する次第である。

参考文献

1) Troll, C. : "Geo-ecology of the mountainous regions of the Tropical Americas", *Colloquium Geogr.*, No. 9,

223S, 1968.

2) 小泉武栄: 「木曾駒ヶ岳高山帯の自然景観-とくに、植生と構造土について-」, *日本生態学誌*, Vol. 24, No. 2, 78-91, 1974.

3) 横山秀司: 「景観生態学」, 古今書院, 207p, 1995.

4) 松井健, 武内和彦, 田村俊和 (編): 「丘陵地の自然環境-その特性と保全-」, 古今書院, 202p, 1990.

5) 横山秀司編: 「景観の分析と保護のための地生態学入門」, 古今書院, 277p, 2002.

6) Troll, C. : "Geoecology and worldwide differentiation of highmountain ecosystem", *Erdwiss. Forschung*, No. 4, 1-16, 1972.

7) Leser, H. : " Zum Ökologie-, Ökosystem- und Ökotypbegriff", *Natur und Landschaft*, Vol. 59, No. 9, 351-357, 1984.

8) 井出久登・武内和彦: 「自然立地的土地利用計画」, 東京大学出版会, 227p, 1985.

9) 武内和彦: 「地域の生態学」, 朝倉書店, 254p, 1991.

10) 沼田眞: 「景相生態学-ランドスケープエコロジー入門-」, 朝倉書店, 178p, 1996.

11) 小泉武栄: 「「自然」の学としての地生態学-自然地理学のあり方-」, *地理学評論*, Vol. 66A, No. 12, 778-793, 1993.

12) 西川治: 「地理的景観とその研究(Carl Troll)」, *地理学評論*, Vol. 25, No. 5, 36-37, 1951.

13) 小泉武栄: 「日本における地生態学研究, 景観の分析と保護のための地生態学入門(横山秀司編)」, 古今書院, 40, 2002.

14) Leser, H. : " *Landschaftsökologie* ", UTB521, Ulmer, Stuttgart, 432S, 1976.

15) 渡辺悌二: 「北米を中心とした地生態学的研究, 景観の分析と保護のための地生態学入門(横山秀司編)」, 古今書院, 32-38, 2002.

16) 太田猛彦・高橋剛一郎: 「溪流生態砂防学」, 東京大学出版会, 246p, 1999.

17) 玉井信行・奥田重俊・中村俊六: 「河川生態環境評価法 潜在自然概念を軸として」, 東京大学出版会, 270p, 2000.

18) 地盤工学会生態系読本編集委員会編: 「生態系読本 暮らしと緑の環境学」, 地盤工学会, 212p, 2002.

19) 佐々木靖人, 品川俊介, 大谷知生, 脇坂安彦: 「応用地生態学-地学的環境保全学の開発の試み-」, *日本応用地質学会平成12年度研究発表会講演論文集*, 309-312, 2000.

20) 大野博之: 「21世紀における景観地質の役割」, *応用地質*, 41巻, 6号, 383-386, 2001.

21) 笠原茂: 「「自然史観点」による環境保全の提案」, 第4回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, (社)地盤工学会, 165-170, 2001.

22) Finke, L. : " *Landschaftsökologie* ", Westermann,

Braunschweig, 206S, 1986.

23) 小泉武栄: 「山岳域の景相生態, 景相生態学 (沼田眞編)」, 朝倉書店, 27, 1996.

24) 菊池多賀夫: 「地形植生誌」, 東京大学出版会, 1, 2001.

25) 中島教陽・尾園修治郎・西柳良平・佐々木靖人・伊藤政美・応用地生態学研究会: 「文献に見る地盤と生態系の関係」, 日本応用地質学会平成17年度研究発表会講演論文集, 2005.

26) 稲垣秀輝・佐々木靖人・伊藤政美・平田夏実・応用地生態学研究会: 「アンケートによる道路・河川・ダム事業の生態系と地盤環境保全の現状分析」, 土木学会誌, 2005.

27) 道路環境研究所編: 「環境影響評価の技術手法」, 丸善株, 全3巻, 2000.

28) 高橋博将: 「航空レーザー測量における標高精度の検証」, APA, No. 77-9, 66-74, 2000.

29) 伊藤政美・佐々木靖人: 「地盤環境とその変化が生態系に及ぼす影響に関する研究」, 土木研究所平成16年度業務実績報告書, 土木研究所, 2005.

30) 応用地生態学研究会: 「応用地生態学—生態系保全のための地盤の調査と対策—」, 土木研究所共同研究報告書, 2006.

(印刷中)