

応用地質学の方法論としての地形情報取得技術の進歩と未来

国際航業株式会社 向山 栄

1 はじめに

本論は、応用地質学の基礎としての地形学の基本的論理について概説し、さらに地形情報がこの50年間にどのように整備されてきたかを概観して、今後における課題を述べる。なお本稿の内容は、日本応用地質学会50周年記念誌のために用意した原稿から抜粋し、一部を改変したものである。

本稿を準備中に東日本大震災が発生した。わが国の社会状況は新たな局面を迎えたと思うが、その状況を踏まえた上で今後の考察という面では、あらためて内容を十分に推敲することができなかった。しかし、筆者の考えでは、今後の応用地質学の目指すところは、人口減少社会に対応しつつ、エネルギー大量消費社会からの脱却（低炭素社会でもなく、省エネ社会でもなく）を図り、国際的に通用する産業構造を維持・再構築するために、国土の最適な利用法の再検討に資することにあるということ、震災以前にすでに明らかであった。その基本的な論理や情報を提供する学問分野として、応用地形学が貢献するところは大きいはずである。わが国には、先進国としては非常に恵まれた豊かな自然環境が残されているが、それも輸入した化石燃料や原子力エネルギーをふんだんに消費していることと表裏一体である。これらの安定供給が危ぶまれる現状において、自然の理にかなない、かつリスクが小さく、分散型でバランスの取れた国土と資源の利用法を、今後も探索することになろう。

2 応用地質学の基礎としての地形学

応用地質学において、地質学と地形学双方の論理と知識が必要な領域は小さくない。地形学とは、「地球表面の形態の記載、分類、その生い立ち、成因を探究する学問」（米倉信之・貝塚爽平・野上道男編、2001）と説明されている。これを地形構成物質に着目して言えば、私見であるが、地形学とは、「地表面の形態から、固体地球の表層を構成する岩石物質と水、および地球内部からの噴出物が、重力に従って移動する過程と、それを制約する様々な境界条件とを明らかにし、これらの因果関係を探究する学問」であるといえよう（ここで、重力の作用には、二次的効果としての潮汐力が含まれる。また境界条件の中には、気圏・水圏との境界における様々な物理化学的反応や、地殻変動・地震動・火山噴火などの内部営力のほかに、人類を含む生物の活動による営力も含まれる）。地表面付近の物質は、地質学と地形学の共通の対象であり、それらがどのように形成され現在の場所に定着したかという、空間配置の変遷を復元し理解するためには、地形学の知識は不可欠である。また地質学も地形学も、他の科学分野と異なる最も大きな特徴である「物質の時空間的連続性を扱う」論理体系を持つ。応用地質学的課題における時間スケールは、通常は時間単位から 10^1 年、長くて 10^5

年オーダーより短い。これは極微地形～微地形、最大でも小地形が形成・維持される時間とオーダーが一致する。したがって表層物質の特性については、地形学の論理で議論できる課題も多い。

3 応用地質学に関わる地形学の基本的論理

応用地質学の定義は、日本応用地質学会ホームページなどに「人間の自然に対する生産活動を、地質学の立場から調査・研究する学問」と掲載されている。この定義に「地形」という用語は現れないが、応用地質学が社会に貢献する領域は幅広く、その中での地形学の役割も多様である。鈴木（1990）は、地形学の諸分野の体系的分類として、「純粋地形学」を地形誌論、地形発達史論、地形過程論からなるとし、それに対して、「応用地形学」「地形工学」「地形解析学」を下記のように定義した。

◇応用地形学 Applied geomorphology

形成過程の明らかな地形種の空間的・時間的変化を論拠に、地形以外の事象の空間的・時間的変化および特質を説明、推論、遡知、予知する。例：地形学的編年論、地殻変動論、海水準変動論、古環境論、古気候論、地盤判別論、自然災害予測論、地形水文学

◇地形工学 Engineering geomorphology

地形の保全・改造法の理論と技術を研究・開発する。現状では地質工学、土木工学、砂防工学、自然災害工学の一部。例：任意地点・地域における地形災害防止策の立案、地形の自然的・人工的变化に伴う環境変化の予測、建設計画への助言

◇地形解析学 Topographic analysis

地形以外の事象を説明するために、地形の成因は問わずに、地形をその事象の制約要因のひとつとして記述、測量、解析する。例：次の分野で地形が解析されている。気象学、気候学、水文学、土壌学、地質学、火山学地球物理学、生態学、農学、林学、砂防工学、土木工学、鉱山学、火災学、風土学、地理学、歴史学、哲学、軍事学など

これらを簡単に言い換えれば、それぞれ「応用地形学」は、地形過程を別の事象を説明するための物差しとして扱う学問、「地形工学」は、地形を施設の設計条件もしくは構造物の一部と見なし、また工事の材料として利用する方法を考える学問、「地形解析学」は、地形形状を別の現象が発生する場の入れ物（形および表面の材質）として扱う学問ということになろう。

このように地形学は、様々な領域において応用地質学に関わっている。これらの応用的な地形学の基本論理は、地質工学と

同様に「現象論」,「物性論」「方法論」で示すことができよう。現象論の論理は, 純粋地形学を基礎とし, 地表面の形状からその成因を推定し, その時間的変化を復元・予測することと, 人工改変に伴う自然過程の擾乱の効果を推定することである。物性論の論理は, 地形から必要な空間領域の大きさや配置を知るとともに, 地形の成因から地表面の構成物質の性状を推定し, 設計に必要な物性値を得ることである。また方法論は, 地形の形状測定技術とデータの情報化・符号化技術, および地形の時系列的変化に時間目盛りを与えるための技術に関する論理である。

次章以降では, これらの基本論理のうち, 地形情報に関わる方法論に関する技術の変遷について概観する。

4 地形情報

4.1 応用地質学に関わる地形情報の意義

地形からは, 建設工事や環境評価に関わる様々な情報を読み取ることができる。表1には, ある地形とその空間位置から引き出すことのできる地形工学的情報とそれを適用させる分野について整理した。

このような地形の情報も, 地質調査報告書などにおいては, 今なお予察的な概査の段階でのみ扱われ, 詳細調査において有効な情報を提供している機会は多いとは言えない。その理由は, 地形情報を物性論と繋ぐ論理の確立が困難なことと, 現象論としての地形学の理解と方法論とが, 応用地質的な空間的・時間的スケールにおいて有効となるまで成熟してこなかったことにあると思われる。

応用地質学における地形情報の扱われ方を歴史的に見ると, 国鉄の地質技術者であった渡部貫は, 既に「地質工学 (1931)」において, 土木工事の計画段階では地形情報が重要であること

を主張し, 明治以降の近代日本の国土整備の中で, 多くの事業が地形を無視したが故に損害を被った事例を挙げている。このような指摘にもかかわらず, 応用地質学の基礎としての地形学の体系化は, 1950年代までに行われた日本の骨格的な社会基盤の整備には間に合わなかったといえる。しかしその後, 戦後の高度成長期から今日に至るまで, 詳細な地形情報が急速に整備され, また地形学の諸分野も国土の開発を追うように進歩してきた。それらが, 高速交通網の建設 (新幹線・高速道路の建設など) や, 山間地の土砂災害の防止など, 社会基盤整備の現場における問題解決に大きく貢献したことも事実である。

これらの成果は, 地形工学と呼ぶべき分野として体系化されたとは, まだ言えない。しかし1995年に日本地形学連合は第1回地形工学セミナーを開催し, その講演をとりまとめた「地形学から工学への提言」(1996)を刊行した。またその著者の一人である鈴木隆介は, 1977年～1984年に「現場技術者のための地形図読図入門」を測量技術協会誌に連載しており, それらを1997年～2004年に同表題の4巻の技術書として刊行した。これらは地形工学の解説書であると共に, 地形学の論理を多数の事例に基づいて詳細に展開したすぐれた教科書である。現在は, これまでの経験を踏まえ, さらに新しい地形情報や計測技術の評価も加えて, 地形工学の体系化が進みつつある状況であり, 今後の社会基盤の維持や再生にあたっての地形学からの貢献が期待される。

4.2 地形情報の整備

1) 航空写真測量による地形図と空中写真判読

地形学は地形を情報化する技術と共に発展してきた。地形の「情報化」とは, 地形の特徴を, 繰り返し再現できるような手法で記述することであり, 文章, 絵図, 写真, 地形図から数値

表1 地形と各種の地形表現図・空中写真などから読みとれる地形工学的情報

地形情報		位置	地形場	地形種*の形状から読み取る要素				土地利用・植生
				地質構造	材質	形成過程	付随現象	
概要分野								
建設計画・施工物の形式		○	○	○	○	○	○	○
施工性	工法・掘削能率	○	○	○	○	—	△	—
	支持力・強度	—	—	△	○	○	△	—
	地下水・湧水	△	△	○	○	○	△	△
	安定性・応力	—	—	○	○	○	△	—
	有毒性・環境	—	△	—	○	○	○	○
	運搬・スペース	○	○	—	—	—	—	○
竣工物の性能		○	○	○	○	△	○	○
利便性・有効性		○	○	—	—	—	○	○
防災・維持・安全対策		○	○	○	○	○	○	○
環境保全・景観 (フィジカル・メンタル)		○	○	○	○	○	○	○

*地形種の用語は, 鈴木 (1997) に従う。材質には風化・劣化状況も含む。付随現象とは地殻変動に伴う地震動や火山噴出物による温度変化などが含まれる。

データまで、古代からいろいろな手法が採られてきた。現代においては、これらをさらにコンピュータで処理できるよう符号化するとともに位置情報を与え、地理情報のひとつとして汎用する、すなわち GIS に対応できる地形情報も多くなりつつある。地形を定量的に情報化する基礎的な技術は、測量技術である。この 50 年間の進歩は、航空写真測量から航空レーザ測量への変化といえよう。

航空写真測量による機械図化は、戦前から満州などでは実施されていたが、国内では 1953 年に本格的に始められた。その後、1964 年から国土の基本図を航空写真測量で作成した 2 万 5 千分の 1 地形図によって整備することとなり、1983 年までにほぼ全国土の図面が完成した。2 万 5 千分の 1 地形図からは、10¹m オーダー以上の規模を持つ微地形を読み取ることができる。地形図読図や地形解析の精度が格段に向上したことは、地形学の進歩にとって大きな役割を果たした。

また、写真測量のために撮影された空中写真を用いた写真判読技術の地形学への貢献も大きい。空中写真からは、地形図では図式で描画できない実地形の情報も立体視によって実態とほぼ同様に把握できる。1944 年ころから 1951 年まで米軍によって撮影されていた空中写真は、1952 年から市販されるようになった。それに代わり林野庁による 2 万分の 1~1 万 6 千分の 1 の空中写真の撮影が 1952 年から始まり、さらに国土地理院は 1960 年から全国平野部の 2 万分の 1、1964 年から全国 4 万分の 1、1969 年から平野部周辺の 2 万分の 1~2 万 5 千分の 1 の空中写真を撮影するようになった。加えて 1974~1978 年には全国の 8 千分の 1~1 万 5 千分の 1 空中写真も撮影され、変化の激しい地域については現在まで経年的に再撮影が行われている。これらの空中写真は市販されたため、空中写真の立体視による地形判読の技術が一般に普及するようになった。

大縮尺空中写真の空間分解能は、2 万 5 千分の 1 地形図よりも細かく、10¹m オーダー以下の超微地形の地形判読が可能となった。技術的發展が行われる上での重要な条件は、調査解析を行う対象と使用する技法の扱える時空間的分解能が一致するかどうかということである。応用地質学会の創立時は、ちょうど空中写真判読技術の土木建設分野への導入の時代にあたり、また建設工事が丘陵地や山地において実施されることが多くなった時代でもある。防災や建設物に対して工学的に要求される時間スケールは、原子力関連施設などの特殊なものを含めても 10¹年~10⁵年程度であろう。空中写真を用いた地形判読では、判読できる地形の規模は極微地形~微地形从小地形であり、これらの形成に要する時間のオーダーと一致する。すなわち日本の山地における斜面変動を理解する上で指標となる微地形のスケールと、当時使用が可能になってきた空中写真を用いた判読の空間分解能とが適合したことが、この時代に斜面変動の研究が精力的に進められたことの背景にあると思われる。

1960 年代から 1970 年代半ばまで、様々な現場で実践された写真判読技術は、1980 年ころまでにひととおり体系化され、1985 年頃までに各種の教科書が刊行された。また体系的な判読の成果として、「日本の活断層」(1980)や「5 万分の 1 地すべ

り地形分布図」(1982~、2011 年完成予定)のような総攬的地形判読図も作成されるようになった。その後、「九州の活構造」(1989)や「北海道の地すべり地形」(1993)などが刊行され、1995 年の阪神・淡路大震災以降の「2 万 5 千分の 1 都市圏活断層図」なども合わせ、総攬的な地形判読成果が普及した。1990 年代以降は、それらを踏まえつつ、空中写真判読を各々の建設現場に用いる新たな実践の時代が現在まで継続していると言える。

2) 衛星リモートセンシング技術と GPS

人工衛星を用いたリモートセンシングの技術は、1970 年代半ばに実用化し、1975 年には、LANDSAT-2 衛星による 80m 解像度の画像が得られるようになった。1984 年の LANDSAT-4 で解像度 30m、1986 年には SPOT-1 衛星で解像度 10m となり、さらに 1999 年からの IKONOS 衛星による 1m 解像度の画像は、1/10,000~1/20,000 の空中写真に匹敵する地上分解能をもつ。このような高分解能衛星画像は、広域的な大規模災害の情報収集にも有効であることが確認された。

また 2006 年から運用された我が国の陸域観測技術衛星 ALOS (Advanced Land Observing Satellite) は、1/25000 クラスの地形データを作成できる「パンクロマチック立体視センサ (PRISM)」、昼夜天候を問わない地表観測が可能な「L バンド合成開口レーダ (PALSAR)」、高性能可視近赤外放射計 2 型 (AVNIR-2)」を搭載し、広域の地形データを容易に取得できるほか、微小な地表の経時的な変化を広範囲に捉えることができる。とくに PALSAR によって、地震時の広域的地殻変動や大規模なマスマーブメントの領域を迅速に把握できるようになった意義は大きい。今後は、国内外の衛星の高分解能画像やマイクロ波を用いた全天候型地形計測センサによって、地表の変動を迅速に捉える技術が普及し、災害などに関連する地形情報として広く用いられるようになると思われる(残念ながら、ALOS 衛星は機能障害により 2011 年 5 月に運用を終了しており、後継機の早期打ち上げが待たれる)。

人工衛星を用いた技術のもう一つの重要な発展は、米国防省の GPS に代表される、精密衛星測位技術の実用化である。GPS は元々軍事技術として開発されたものであるが、1983 年以降、民生用としても運用されるようになり、さらに 1996 年に民生利用の精度維持が米国内で法的に認められると、測地技術からカーナビゲーションなどの移動体追跡技術まで、幅広い分野での利用が急速に進んだ。我が国においては、国土地理院が 1987 年に GPS を導入し、1993 年から全国 GPS 連続観測網の整備を開始した。2003 年には 1200 箇所の電子基準点による常時観測の測位が実現し、2004 年以降は日本列島の地殻変動がリアルタイムに 1cm 精度で把握できるようになっている。また、GPS 観測は地すべり・崩壊などの斜面変動や火山の山体変形の動態把握にも用いられ、連続観測によってきわめて高精度に変位を抽出することもできる。

GPS 測位技術はさらに航空測量の分野にも適用され、航空レーザ計測という新しい測量技術も生み出した。航空レーザ計測は我が国では 2000 年頃に実用化し、地形図作成に用いられるよ

うになった。航空機レーザ計測の利点は、直接計測された正確な位置情報を持つ計測点が面的に高密度かつ膨大な量で取得されることと、それらがすべて数値データ化されているため、計量処理が迅速で、詳細な3次元地形モデル作成が容易にできることである。地上での計測点分布密度は、数10 cm～2m四方ごとに1点程度であり、実地形がそのまま縮小されたような極めて精密な3次元地形モデルが構築できる。この地形モデルは、1/1,000～1/2,500地形図に対応するスケールであるが、従来の航空測量地形図では描画しなかったような極微地形～超微地形（数m～十数mより小さい規模）も再現できるようになった。また数値モデルであることから、ラスタ型グリッドモデルとしての扱いが容易で、様々な地形量を演算し数値地形解析を行うことができる。DEMを用いた地形解析は既に地形学のみならず応用地質学の分野でも実践されている。これらの例としては、平野・横田（1976）に先駆的な研究があり、太田（2006）に各種の解析手法が整理されている。さらに、空中写真判読に匹敵するような画像を作成できるようになった結果、人間の視覚と数値地形解析とを組み合わせた「デジタル地形判読」や画像処理と数値地形解析とを組み合わせた数値地形画像解析も現実的になっている（図-1）。地形情報の空間分解能が飛躍的に向上した結果、地形の変化が微小レベルにまで準リアルタイムに捉えられるようになった。それによって、これまで必ずしも適切に記述することができなかった現象についても理解が深まり、客観的な記載ができるようになるのではないかと考えられる。

4.3 地形情報のデータベース

我が国における基本的な地形情報は、等高線地形図と数値標高データ（DEM：Digital Elevation Model）として整備されて

いる。地形図に関しては、前項に述べたとおり、国土基本情報としての1/25000地形図は1983年に全国整備された。これらはその後、GIS基盤情報の整備・普及の促進（空間データ基盤）の流れの中で、ベクトル化した数値地図画像としても整備された。一方、数値標高データは、1991年に国土数値情報のひとつとして250mメッシュの標高データおよび傾斜度細分データが全国整備され、その後1999年に、50mメッシュの標高データが全国整備され、地形計量的な研究の転機（野上、1995）となった（2009年に10mメッシュ標高データに移行した）。しかし、これは等高線地形図から作成されたものであり、広域的な地形学的研究などには有効であったが、通常の建設現場や斜面災害のスケールでの解析には空間分解能の上でも精度的にも難点があった。レーザ計測などによって取得された高分解能の標高データ（5mメッシュ）は、2003年から一般向けに提供され始めた。この空間分解能は、地形のスケール区分に対しては微地形に関する最小限の地形量が得られる程度であるが、今後はこれが応用地質分野において幅広く利用されることとなるであろう。

我が国においては、さらに主題図的で応用地質学との関わりが深い地形情報のデータベースがこの50年間にいくつか作成された。まず、地形分類図は主に1950年代から1970年代にかけて、国土の復興と土地利用の高度化を図るために国の各機関によって作成された。これらは比較的初期から作成されたものも多く、現在では過去の状況を知るためのアーカイブデータとしての価値を持つ。現在でも使用される頻度が高いものに、国土地理院による各種の土地条件図・治水地形分類図があり、これらは現在でも刊行が進められている。また全国の地形分類と標高・傾斜・起伏量をまとめた「日本の地形・地盤デジタルマップ（2004）」も刊行され、1kmメッシュではあるが全国一律の

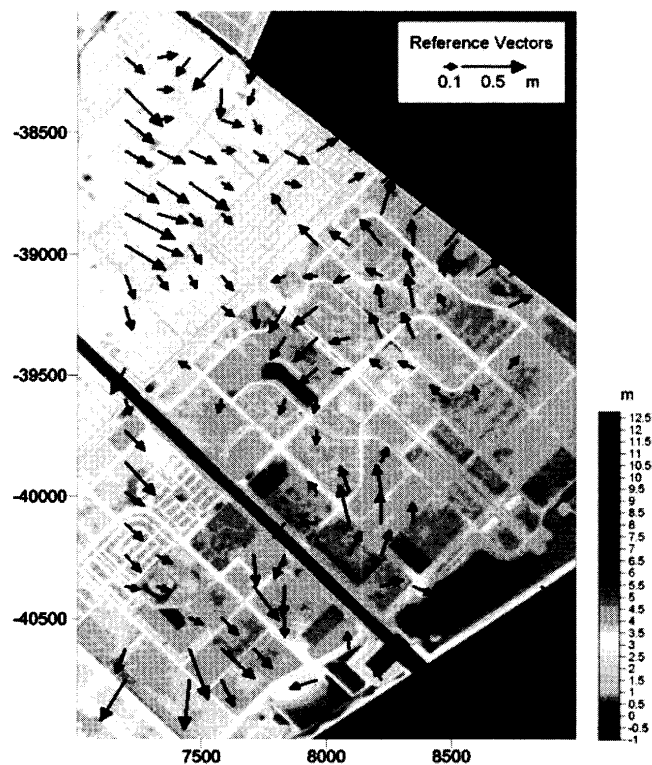


図-1 2011年東北地方太平洋沖地震で発生した東京湾岸埋立地における液状化による地表面移動。

2 時期の航空レーザ地形データを用いた数値地形画像マッチングによる地表面移動ベクトル解析結果。背景図は地震前の標高図。地形データは国際航業株式会社提供。

均質に見える埋立地にもわずかな標高の違いがあり、また地表面の移動方向は場所によって系統的に異なる様相を示している。このような微小な変動を、従来の写真測量の手法で面的に詳細に把握するのは困難である。地盤高の違いは埋め立て時期により、盛土高が異なることによるもの。

GIS データとして利用できる。災害地形の主題図的データベースとしては、地すべりについては、防災科学技術研究所が「5 万分の1 地すべり地形分類図」を1981 年から刊行し、デジタル化の過程を経て2010 年には全国を網羅したほか、既往斜面災害データベースも公開されている。また変動地形に関しては、全国の活断層を網羅する「日本の活断層(1980, 新編1991)」, 「活断層詳細デジタルマップ(2002)」があり、地域限定の活断層図や「2 万5 千分の1 都市圏活断層図(1996〜)」も刊行されている。さらに「日本の海成段丘アトラス(2001)」なども刊行されている。これらの第四紀における編年には、「火山灰アトラス(1992, 新編2003)」にまとめられた火山灰層序編年の成果が重要な役割を果たした。これらの地形に関するデータベースや網羅の主題図は、空間分解能や精度は様々に異なるが、国土の地形特性が概観的に把握できるものであり、今後中長期的な土地利用を再検討する際の基礎情報としての利用価値が高い。最近30 年間の応用地質学的地形情報に関する重要な研究成果の一つである。

5 今後の展望

測量技術の進展という観点では、前半の25 年は空中写真測量の導入による2 万5 千分の1 地形の全国完備の時代であり、後半は、アナログ空中写真測量のデジタル化、衛星リモートセンシングによる画像データの高精細化などの進展が見られ、さらに最近の10 年間においては、GPS 測位技術の広範な利用と航空レーザ測量技術の実用化によって、高精細度、高時間分解能の地形情報の面的な整備が急速に進められた。それによって、地形情報のデータベースも、紙地図からデジタル地形図・数値標高データへ、等高線表示から面的に稠密な地形表現法へ、情報更新はリアルタイムへ、といった進展がみられた。

その結果、地表面の情報に関しては、現実世界の写像としての時空間的な一致度が急速に高まっている。地形情報の解像度の飛躍的向上は、狭い空間で起こる微小な事象の過程を詳細に再現することに貢献する。モデル化した数値地形情報を時系列的に用いることにより、写真判読では困難な地表の微小な変化や、現地踏査での目視では識別が困難な地表の微小変状も抽出できるようになりつつある。また、地表踏査や読図では意味づけが困難だった微小地形について、概観的あるいは詳細に3 次元的に把握することによって、応用地質学的な意味ある情報として認識できるようになりつつある。一般的に、微小な地形の形成時間は短い。したがって、地形の解像度が高くなれば地表面の動的現象の時間分解能が向上することが期待でき、地形情報からの災害予測などの精度向上が大いに期待できる。

一方、国土地理院は国土情報アーカイブとして、過去に撮影された空中写真(米軍写真を含む)をデジタルデータで公開し始めた。1960 年代に大規模な地形の人工改変が進行した我が国においては、過去の地形情報を知ることが重要である。旧版地形図や過去の空中写真など、地形を復元できるアーカイブ資料の普及は、今後の応用地質学の発展にも重要な役割を果たすと思われる。

なお、全国一律に利用できるスケールの地形情報の整備が進む一方で、地下の地盤状況を高密度かつ簡便に知ることは今なお簡単ではなく、現実世界との乖離が大きい場合も少なくない。地下の地質情報が、地表の地形情報の精度に追いついていない状況も生まれているように思われる。今後、3 次元的に稠密な精度の良い地盤情報を、少ない地下データから効率よく構築するために、地形情報を用いて積極的に支援ができるような地形工学的論理体系を構築することが一層求められると考えられる。

文献

- 米倉伸之・貝塚爽平・野上道男編(2001): 日本の地形 1 総論, 東京大学出版会, 376p.
- 渡邊 貫(1931): 地質工学, 古今書院
- 日本地形学連合(1996): 地形学から工学への提言, 地形工学セミナー 1, 古今書院, 162p.
- 鈴木隆介(1997): 建設技術者のための地形図読図入門 第1 巻 読図の基礎, 古今書院
- 鈴木隆介(1998): 建設技術者のための地形図読図入門 第2 巻 低地, 古今書院
- 鈴木隆介(2000): 建設技術者のための地形図読図入門 第3 巻 段丘・丘陵・山地, 古今書院
- 鈴木隆介(2004): 建設技術者のための地形図読図入門 第4 巻 火山・変動地形と応用読図, 古今書院
- 鈴木隆介(1990): 実体論的地形学の課題, 地形, 11, pp. 217-232.
- 野上道男(1995): 細密 DEM の紹介と流域地形計測, 地理学評論, Vol.68, Ser. A, No.7, pp. 465-474.
- 九州活構造編集会編(1989): 九州の活構造, 東京大学出版会, 562p.
- 岡田篤正編(2000): 近畿の活断層, 東京大学出版会, 408p.
- 独立行政法人防災科学技術研究所(1982〜2011): 地すべり地形分布図, 1/5 万図幅
- 地すべり学会北海道支部監修・山岸宏光編(1993): 北海道の地すべり地形, 北海道大学出版会, 426p.
- 地すべり学会東北支部(1992): 東北の地すべり・地すべり地形分布図と技術者のための活用マニュアル
- 中田 高・今泉俊文編(2002): 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 68p.
- 小池一之・町田 洋編(2001): 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会, 122p.
- 町田 洋・新井房夫(1992, 新編2003): 火山灰アトラス—日本列島とその周辺, 東京大学出版会, 276p
- 平野昌繁・横田修一郎(1976): 西南日本に例をとった電子計算機による地形数値解析, 地理学評論, 49, pp. 440〜454.
- 太田岳洋(2006): 数値標高モデルによる地形計測の現状と応用例, 応用地質, Vol.46, No.6, pp. 347-360.