

博士論文

災害・環境解析のための
リモートセンシング能動型センサの応用

岡谷 隆基

災害・環境解析のためのリモートセンシング能動型センサの応用

目次

1.	はじめに	1
(1.)	図表集	3
1. 1	リモートセンシングによる地形の把握	4
1. 1. 1	写真測量	4
1. 1. 2	合成開口レーダー (SAR)	5
1. 1. 3	航空レーザ、地上レーザ、MMS	7
1. 1. 4	UAV	8
1. 2	リモートセンシングによる地形の把握の災害への応用	9
1. 2. 1	地震・火山活動	9
1. 2. 2	地すべり・斜面崩壊	9
1. 2. 3	洪水・浸水	11
1. 3	地形の把握に関する既存研究の総括と本研究の目的	12
(1. 3)	図表集	15
2.	レーダーを用いた地形の把握と解析	17
(2.)	図表集	20
2. 1	衛星 SAR-DEM による地形の把握	22
2. 1. 1	手法	22
2. 1. 2	結果及び考察	23
2. 1. 3	広域スケールの SAR-DEM とその活用方策	24
2. 1. 4	まとめ	25
(2. 1)	図表集	26
2. 2	航空機 SAR-DEM による地形の把握	30
2. 2. 1	手法	30
2. 2. 2	結果及び検証	31
2. 2. 3	考察及び成果の活用方策の検討	31
2. 2. 4	まとめ	32
(2. 2)	図表集	33
2. 3	衛星 SAR による地すべりの解析	38
2. 3. 1	手法	38
2. 3. 2	結果	41
2. 3. 3	検証及び考察	41
2. 3. 4	まとめ	43

(2.3 図表集)	45
3. レーザを用いた地形の把握と解析	49
3.1 地上レーザによる地表地震断層の把握	50
3.1.1 手法	50
3.1.2 結果及び考察	51
3.1.3 まとめ	53
(3.1 図表集)	54
3.2 MMSによる津波被害の把握	59
3.2.1 手法	59
3.2.2 結果及び考察	61
3.2.3 まとめ	63
(3.2 図表集)	64
3.3 航空レーザによる森林の形状と斜面安定性の解析	69
3.3.1 航空レーザによる森林の3次元要素の把握	70
3.3.2 手法	71
3.3.3 森林の3次元要素の把握に関する結果及び考察	74
3.3.4 斜面安定性の評価への寄与についての検討	78
3.3.5 まとめ	79
(3.3 図表集)	81
4. 考察	90
4.1 能動型センサの特性	90
4.1.1 レーダー	92
4.1.2 レーザ	93
(4.1 図表集)	95
4.2 自然事象別にみた能動型センサの応用	97
4.2.1 火山噴火	98
4.2.2 地震	100
4.2.3 津波	102
4.2.4 地すべり	104
4.2.5 斜面崩壊	105
(4.2 図表集)	107
4.3 本研究の総括	112
(4.3 図表集)	114
4.4 自然環境学における本研究の意義	115

(4. 4 図表集)	1 1 7
5. おわりに	1 1 8
謝辞等	1 1 9
参考文献	1 2 0

1. はじめに

「自然環境学」は「人類の生存や生活に影響を与える自然事象の構造や性格、仕組みを解明し、自然環境が人類に与える影響や人類が自然環境に与える影響を評価し、人類の生存と生活を持続させ、発展させるために、よりよい自然環境を創成する方策を考究する学問」と定義されている（大森ほか, 2005）。地球は固体地球（地圏）と水圏、気圏、生物圏によって構成されており（大森ほか, 2005）、自然環境学は、これら地圏、水圏、気圏、生物圏における自然事象を対象として、人間活動との関係を扱うものと解される。また、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学研究系（2011）は、近年自然環境学に求められているものとして、①自然環境のメカニズムの解明を進める、②自然環境に生じた問題の解決に貢献する、③自然環境の新たな状況を設定する、の3点を挙げている。同時に、従来の自然科学的手法の伝統に沿った事実記載型の研究を行うことに加え、市民の価値判断が重要な位置を占めるようになってきたことを指摘している。

関連して、「環境学」については、武内ほか（2002）が「個別科学の環境へのアプローチを統合したもの」と定義している。同時に、環境研究は個別科学の一部として取り扱われており、固有の方法論が確立していないという理由で、環境学が1つの学問・科学として成立するのか議論が続いていると指摘している。京都大学で環境学を考える研究者たち（2014）は、武内ほか（2002）による環境学の学問・科学としての成立性への疑問を踏襲する形で、敢えて環境学への定義には踏み込まず、環境問題に関するキーワードを挙げつつ問題を学ぶことの重要性を述べている。一方、環境学の今後の方向性として、真理探究型と問題解決型、および自然科学と社会科学の融合の必要性を強調している。これは自然事象と人間活動との関係を扱うという冒頭の自然環境学の定義とも整合している。また、東樋口（2015）は環境学の定義として、「既存の学問体系の「縦割り」に対して、「地域研究」などと同じ「横割り」として位置付けることができる、文理融合の横割りの学問」と述べ、環境学が環境問題の解決に動員される必要があるとしている。これらのように、環境学が学問として成立するかという議論はあるが、環境学や自然環境学は、自然科学に立脚しつつも社会科学、人文科学といった人間に関わる分野ともつながる学際的な学問であると既存研究では共通に定義している。

次に、「環境」という語について考える。我々が扱う主体を人類と考えれば、「環境」は「人類の生存や生活を支えている空間や場の条件」（大森ほか, 2005）であり、自然事象のほか、土地利用や景観など人間活動と自然事象が結びついた様々なものが対象となる。また、自然事象がひとたび人間活動に被害を与えるようになれば、それは「災害」として認識される。我が国は、主要なプレート境界に位置し、モンスーンの影響を強く受けているため、温泉の湧出や豊富な降水量などの恩恵がみられるが、地震、火山噴火、洪水、斜面災害などの多様な自然災害も、世界的にみて数多く発生している。したがって、「災害」は我々にとって極めて重要な研究対象である。

「災害」や「環境」に関連する自然事象をより正確に捉えるためには、地形の把握やそれに関連する研究が不可欠である。例えば、「災害」をもたらす自然事象は、地震、火山噴火、地すべり、斜面崩壊などの地圏の事象だけでなく、台風や梅雨などによる豪雨、台風や竜巻などによる

暴風等の気圏の事象、津波や洪水など水圏における事象などがある。これらが、人間活動に被害を与え、地形などに変化をもたらす。災害時には、地形が変化するほか建物も損壊などの変形を受けるが、これにも地形の把握に使われる測量などの手法が適用可能である。

また、「環境」の観点では、地形が人間の生活の場を条件付けているとともに、土地利用や森林状態などの生物圏にも影響し、その把握にも地形データと同様にレーザ点群データなどが活用される。さらに、樹木の根系が斜面崩壊の防止に寄与するように（阿部, 1998 など）、生物圏の事象が災害の発生に影響を与える。このように、地形は土地利用や森林状態などを介する形でも災害に関連する（図 1.0.1）。これらを踏まえ、本研究では「災害」及びこれに関連する「環境」について、地形の把握を中心に論ずることとした。以下、本稿では特に断りのない限り、「自然災害」を「災害」と記す。

災害が発生する場の地形を把握するには、関連した情報を収集しなければならない。しかし、地形モデルを作成しようとするれば、視界の範囲内の測量だけでも膨大な量のデータの取得作業を要する。そのため、空中写真による情報取得など、直接的に対象物に触れることなく対象物に関する情報を取得する「リモートセンシング」（測量用語辞典編集委員会, 2011）が活用されてきた。リモートセンシング技術は、地形学などの地理学の分野、地盤工学・地震工学などの土木工学の分野、測量学の分野、地質学、林学、GIS などの情報学など、多くの分野と関連する。本研究では、地形の把握におけるリモートセンシングの活用を重視する。

以下、リモートセンシングが関連する分野の研究の進展についてレビューする。具体的には、写真測量や人工衛星・飛行機等に搭載されたセンサなどリモートセンシング技術に関わる研究、及びリモートセンシング技術を自然災害に適用した研究についてレビューを行う。

(1. 図表集)

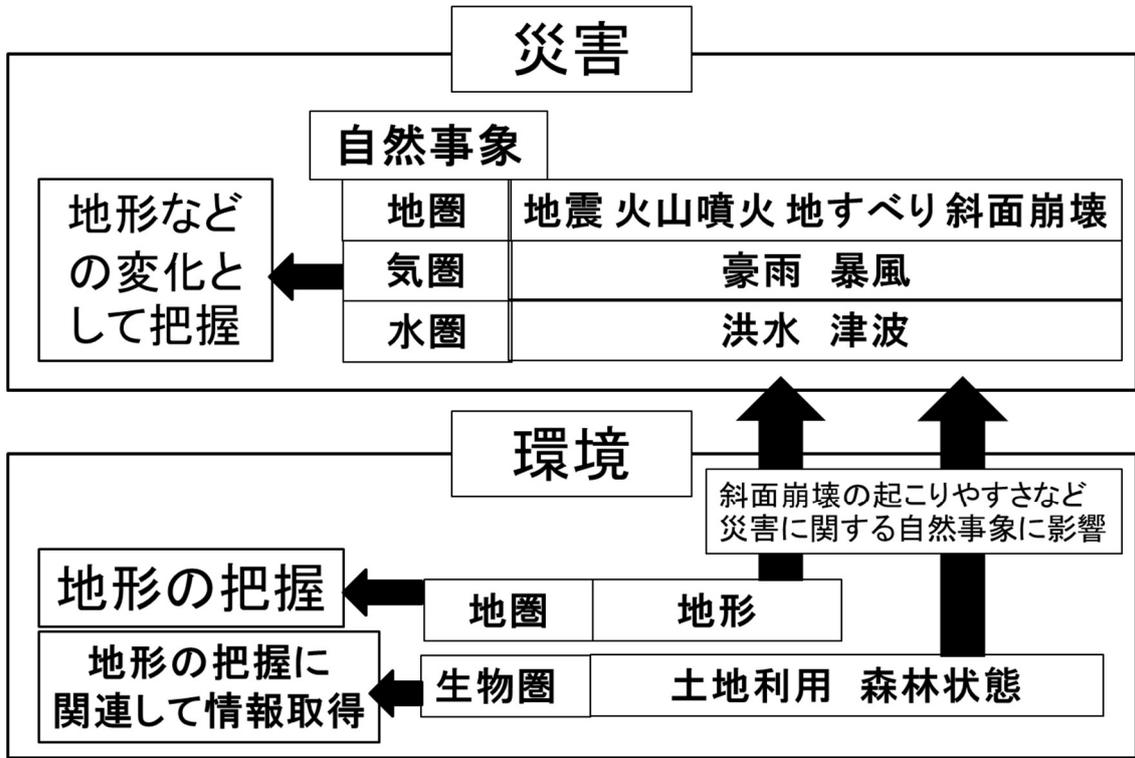


図 1.0.1 「災害」「環境」に対する地形の把握の意義

1. 1 リモートセンシングによる地形の把握

1. 1. 1 写真測量

「写真測量」(photogrammetry)は、リモートセンシングによる地形の把握の中で以前から核をなしてきた技術である。これは、写真を使用して被写体の位置や形状を計測し、状態や性質等の調査を行う(測量用語辞典編集委員会, 2011)。ここでは、空中写真のほか人工衛星などに搭載された光学センサが取得した画像による計測も扱う。被写体の位置と形状の計測は、地図作製や地形計測等において非常に重要な技術である。位置と形状は、同一地域を異なる位置から撮影した一対の写真、すなわちステレオ画像を実体視化する処理から導かれる。このステレオ画像の処理の過程は、アナログ(analogue)、解析(analytical)、デジタル(digital)の3種類に大別される(Torlegård, 1986, 1988; Wrobel, 1991; Walker, 1995など)。

アナログ写真測量は、コンピュータ制御ではなく人間がアナログ図化機を操作することで、空中三角測量や標定・図化を行う手法である。オーストリアのOrelらが、等高線を生成する最初のステレオ図化機を製作した(ブラハト・ブルクハルト, 1988; Torlegård, 1988)。アナログ図化機の操作には熟練を要し、かつ短時間では極めて小さい面積の図化しかできないなど、活用には大きな制約があった。しかし、その後も空中写真測量に利用可能な図化機が開発され、地図作製に利用された(Hart, 1940; Bagley, 1941など)。その結果、地形図を用いた地形計測の研究が活発になった(Oguchi et al., 2013など)。

その後、写真測量を機械などによらず数値解析によって行う方法が開発され、対象物の写真座標からその地上座標を計算によって求める解析写真測量が導入された。解析写真測量は、空中写真測量をコンピュータで行う。空中写真測量とは、空中写真の幾何学的性質を利用し、既知の基準点や標定点などの座標をもとに、図化の際の標定に必要な写真間の接続点の水平位置と高さを求める方法である(測量用語辞典編集委員会, 2011)。多数の画像を処理する手法には、多項式法、独立モデル法、バンドル法などがある(Anderson and Ramey, 1973; Granshaw, 1980; 村井・鈴木, 1982など)。

戦前の我が国における空中写真の撮影・測量は、軍事目的が最優先であった(服部, 1977)。空中写真の調査研究への利用は、昭和12年に制定施行された軍機保護法が空中写真撮影の記録や写真自体の存在を隠したため(木全, 1997)、欧米と比べて大きく遅れていた。民生用の空中写真撮影は、我が国が航空機や航空関係の精密機械を保有することが1952年に認められるまで、終戦後も制限されていた(柳, 1972)。しかし、欧米からの遅れは、解析写真測量が我が国でもあまり時間差をおかずに導入にされたことなどにより、その後縮まった(村井ほか, 1981; 村井・鈴木, 1982など)。

人工衛星を利用した宇宙技術も、この頃徐々に発展を遂げた。リモートセンシングは1960年代に概念が確立され、米国が1972年に最初の地球観測衛星となるLANDSAT 1号を打ち上げて以降、全世界の注目を浴びるようになった(村井・安岡, 2000)。LANDSATに搭載されたセンサが取得した画像は、1982年に打ち上げられた4号機のTM(Thematic Mapper)センサによるものでも分解能が30 m(USGS, 2013)であったため、地形モデル作成への適用例は少な

った。しかし、1986年に打ち上げられた SPOT 衛星に搭載されたセンサが取得した画像は、分解能が 10 m であったため、地形データ作成に多く用いられた(村井, 1987; Konecny et al., 1987; Ley, 1988; Tateishi and Akutsu, 1992; Al-Rousan et al., 1997 など)。人工衛星観測データは、デジタル形式で出力されるため、地理情報システム (GIS) を用いた地形の把握に適している。

さらに、空中写真をスキャニングしたものや、人工衛星による観測で取得されたデジタルデータを直接コンピュータで処理するデジタル写真測量が多数行われた (Lohmann et al., 1988; Theodossiou and Dowman, 1990 など)。これには、デジタル写真測量ワークステーション (DPW: Digital Photogrammetric Workstation; Lohmann et al., 1988; 棚橋, 1993 など) や、デジタルステレオ図化機が用いられた。その後、デジタル処理のみでオルソ画像を作成する技術や、DEM (Digital Elevation Model: 数値標高モデル) の生成を高速に行うシステムが開発され (Gruen, 1994; Heipke, 1995; Smith et al., 1997)、コンピュータの高速化などにより DPW の実用化が進んだ (Graham et al., 1997; Schenk and Toth, 1997)。その結果、標高データの抽出やオルソ画像の作成作業は大幅に効率化し、広域の高解像度の DEM の作成が現実的になった (Chandler, 1999)。また、DEM だけでなく衛星画像自体も積極的に利用された (Rao et al., 1996; Al-Rousan et al., 1997; Toutin and Gray, 2000 など)。ただし、デジタル写真測量は、アナログ的手法と比較して作業の熟練度は要しないが、精度の確保のために十分な数の地上基準点を設ける必要がある (Chandler, 1999 など)。

人工衛星観測データの地図作成への適用は、SPOT4 による観測データまでしか利用可能でなかった 1990 年代末までは、分解能が 10 m 程度だったため、5 万分 1 地形図の一部にとどまるなど限定的であった (岡谷, 2008)。しかし、その後分解能 1 m 以下のデータを取得可能なセンサを搭載した商用衛星が、1999 年の IKONOS を筆頭に次々に打ち上げられ、2000 年代末には得られるデータの分解能が 50 cm 程度まで向上した (雪下・岡谷, 2009)。しかし、商用衛星画像は非常に高価なため、地形モデルの高精度化への期待は高まっているが研究実績は少ない。対照的に、2006 年に JAXA が打ち上げた、ALOS 衛星に搭載された PRISM センサが取得したデータは分解能が 2.5 m であり、比較的安価に入手可能である。このため、同データは 2 万 5 千分 1 地形図の大規模な修正などに活用された (岡谷, 2008)。また、同様に非商用衛星として米国 NASA が打ち上げた、Terra 衛星に搭載された ASTER センサを用いて取得したデータは、全球的な DEM の作成に活用されている (Tachikawa et al., 2011)。

また近年では、SfM (Structure from motion) という手法も画像の 3 次元化に活用されている (Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; Tonkin et al., 2014; 内山ほか, 2014a など)。この手法は、あるシーンをカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、そのシーンの 3 次元形状とカメラの位置を同時に復元するものである (満上, 2011)。

1. 1. 2 合成開口レーダー (SAR)

能動型センサとは、飛行機や人工衛星などのプラットフォーム (platform: 移動体) に搭載されたセンサからマイクロ波 (電波) を発射し、地表面から反射されるマイクロ波をとらえて観測

を行うものであり（宇宙航空研究開発機構, 2003）、地形などを観測するのに適している。能動型センサは、夜間や曇天時など太陽光の反射が得られない状況でも、地表面の情報取得が可能という利点がある。ただし、マイクロ波を照射してそれを単に観測しただけでは取得したデータの分解能が低いため、アンテナの開口面を実効的に合成する処理が必要である（畚野, 1981）。この処理技術を用いた能動型センサを、合成開口レーダー（SAR: Synthetic Aperture Radar, 以下「SAR」と呼ぶ。）という。SAR に用いられる長波長のレーダーは、矮小な地物の影響を受けづらいという利点がある。この利点を踏まえ、地形の把握や地形の変化を捉える干渉 SAR（Interferometric SAR: InSAR）という手法が、1970 年代に Graham（1974）によって考案され、その後実践的な成果が Zebker and Goldstein（1986）により示された（Huadong et al., 2000）。SAR は、地形モデルの作成に多大な貢献をしている。

SAR を用いて取得されたデータを用いた DEM の作成の研究は、プラットフォームに航空機を用いたもの（航空機 SAR）が海外で先行した。ただし、CCRS（Canadian Centre for Remote Sensing）などが当初実施した、航空機 SAR を用いた研究は、同じ場所を別々の時期に観測することで干渉処理を行ったため、時間的な変化を完全に消去することはできなかった。しかし、航空機に複数の受信アンテナを搭載して観測を行うことで、後続の研究はこの問題を解決した。例えば、Zebker et al.（1992）は NASA/JPL-TOPSAR データを用いて、凹凸の激しい地形と緩やかな地形について DEM の作成と精度検証を行った。結果として、急峻なところで DEM の精度は 20~30 m 程度（以下、DEM の精度は、標高に関する精度・誤差のこととする。）、緩やかな場所では 3 m 程度の精度になると指摘した。さらに Madsen et al.（1993）は、山岳地域における事例研究から DEM の精度は 5 m 程度と示した。また、ヨーロッパでも DO-SAR が開発され、Faller and Meier（1995）などが研究事例を示した。

他方、人工衛星 ERS-1 が 1991 年、JERS-1 が 1992 年に打ち上げられると、当該衛星に搭載された SAR（衛星 SAR）により観測されたデータを用いた、DEM の作成に関わる研究が行われるようになった。Zebker et al.（1994）は、DEM の精度検証を 5~6 点のタイポイントについて行い、精度は 5 m 程度と指摘した。Lanari et al.（1996）は、多波長データの合成による DEM の精度検証を行った。ただし、ERS-1 や JERS-1 により取得されたデータは、分解能が 20 m 程度と低く、高密度の DEM が得られなかった。このため、SAR による観測データを用いた研究は、地震活動などに伴う cm オーダーの地形変化が得られる、干渉 SAR を用いたものが中心となった（Gabriel, et al., 1989; Massonet, et al., 1993; Peltzer and Rosen, 1995 など）。

我が国でも、1990 年代に DEM の作成に関わる研究が活発化した。例えば、村田（1994）は航空機 SAR の観測で取得されたデータを用いて DEM を作成し、誤差を 10 m 以下と評価した。また、この頃 JAXA/NICT が 1996 年に Pi-SAR を開発したことや（宇宙航空研究開発機構, 1997; 情報通信研究機構, 2014）、1996~1997 年度に国土地理院が航空機 SAR を導入したこと（小荒井, 1999）など、1.5×1.5 m 程度の分解能のデータを得られる環境が拡大した。一方、衛星 SAR による観測データを用いた研究では、藤原ほか（1997）が JERS-1 のサハリン北部の観測データを用いて、7 m 程度の精度の DEM が作成できることを示した。

SARにより観測されたデータを用いたDEMの作成は、多くは干渉SARによる。しかし、反射強度データについて干渉処理を行わずに画像化したものを、ステレオマッチング的に処理してDEMを作成することも原理的には可能で(木村, 1987)、事例は少ないがToutin(1995, 1996)などの成果がある。Toutin(1996)は、分解能が30 m程度と低いERSの観測データを用いてDEMを作成し、その精度は20~30 mと示した。ただし、この精度は画像中で地物形状を判定しやすい湖岸線などに限定された。杉村・田中(1998)は、分解能が8 m程度と高いRADARSAT-1の観測データを用いてDEMを作成したが、その精度は60 m程度であった。国土地理院も、JERS-1とEERS-1の観測データの組合せにより、地形モデル作成に関する開発を試みた。しかし、データの分解能が低く、画像上の明暗パターンの分布が不明瞭だったため、マッチングに困難を伴い、地形モデルの提示には至らなかった(建設省国土地理院, 1994)。また、反射強度画像で地形変化を把握する研究も行われ、例えば飛田ほか(2001)は0.4 m程度の変化が計測可能なことを示した。

他方、SAR観測データによる地形の把握への適用事例として特筆すべきものには、2000年に米国が実施したSRTM(Shuttle Radar Topography Mission; Jet Propulsion Laboratory, 2015)がある。このミッションの成果は、全球の30 m及び90 mグリッドDEMデータとして作成・公開された(Rabus et al., 2003)。このデータは、地形学などの数多くの研究に活用されている(Kääb, 2005; Simard et al., 2006; Iwahashi and Pike, 2007; Ehsani and Quiel, 2008など)。また、グローバルな地理空間情報を公開・提供した、地球地図プロジェクトが標高データとして採用したGMTED2010(USGS, 2010)の主要構成データとなるなど、他の全球的な地理情報にも活用されている。

1. 1. 3 航空レーザ、地上レーザ、MMS

地形モデルの作成には、レーザ測距装置を飛行機などに搭載して観測を行う手法が効率的である。この観測データと、GPS/IMU(慣性計測装置)の計測結果を組み合わせることで、地表の3次元座標を取得する手法を「レーザ測量」と呼ぶ。レーザ測量では、観測対象となる地物の表面までの距離が得られる。例えば航空機から地表に向けて観測を行えば、建物の屋根や樹冠をつないだ形状モデル(DSM: Digital Surface Model; 数値表層モデル)が得られる。レーザの一部は樹冠を透過し地表まで届くため、地表に届いたとみられる観測データをつなげて処理すれば、地盤高に相当する地形モデル(DTM: Digital Terrain Model; 数値地形モデル)が得られる。ただし、一般的にDEMもDTMと同様の意味に用いられることが多いため、本研究ではDSMとの使い分けが必要な場合のみDTMの語を用い、それ以外ではDEMの語を用いた。

レーザ測量に関して用いられる、LIDAR(Laser Imaging Detection and Ranging 又は LiDAR: Light Detection and Ranging)の語は、レーザを発射しその反射光を検出して対象までの距離などを計測・解析する手法又は装置を意味する(測量用語辞典編集委員会, 2011)。LIDARの語は、「航空LIDAR」「地上LIDAR」として、航空機、自動車、三脚など、センサを搭載する複数の対象について使われる。しかし、航空レーザと航空LIDARは、しばしば同義として使われる

ため、本研究ではまとめて「航空レーザ」と記すこととした。また、地上 LIDAR に当たるものは、三脚等に固定されるものが一般的に「地上レーザ」と呼ばれており、自動車等のプラットフォームに搭載されるものが一般的に「MMS」(Mobile Mapping System: モービルマッピングシステム又はモバイルマッピングシステム) と呼ばれるため、本研究ではそれぞれ「地上レーザ」「MMS」と記すこととした。

航空レーザによる測量データを用いた研究は、1960年代から行われており (Link, 1969 など)、広域にわたる地物形状データが得られるため、1980年代には森林分野で活発化した (Nelson et al., 1984, 1988 など)。また、Hodgson and Bresnahan (2004) は、1990年代後半に DEM の作成の本格的な取組が起り始めたとしており、その後 2000年代に DEM の作成に関連する研究が増加した (Kraus and Pfeifer, 2001; Göpfert and Heipke, 2006 など)。我が国における航空レーザ測量は、国土交通省の地方整備局や国土地理院などにより実施されている。2012年3月の段階では国土の約 45%に相当する約 17 万 km² の 5 m メッシュ標高データが提供されていた (国土地理院, 2012a)。データの精度は水平方向 1 m、高さ方向 0.3 m とされる (国土地理院, 2014)。加えて、地方公共団体による観測データや、民間航測企業等が販売するデータもあるため、現在では平野部の大半の詳細な標高データが利用可能である。

地上レーザは地上に設置した三脚上のレーザ測距装置から 3次元座標を取得するため、その機器は TLS (Terrestrial Laser Scanner: 地上 3次元レーザスキャナー) と呼ばれる。地上レーザ測量は、一般に航空レーザ測量よりも高精度であるが、データが膨大となるため計測範囲は数百 m 四方以下と狭いことが多い。具体的な研究事例は、地形を扱った Bitelli et al. (2004) などや、建造物を扱った趙・柴崎 (2000) などがある。

MMS は、自動車などの移動体、GPS などの航行用センサ、ビデオカメラやレーザ機器などの観測用センサからなる (Li, 1997)。MMS は、我が国では道路データの取得などに用いられており (山野, 2000)、センサ周囲の地物の 3次元形状を把握可能である。ビデオカメラ画像との組み合わせにより、具体的な地物に 3次元座標を結び付けることが可能であり、MMS は地形に関連する要素を取得できる有用な手段である。

1. 1. 4 UAV

災害に関連した研究は、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) などの比較的新しい技術分野においても、近年活発化してきている。例えば、災害抽出への技術適用を検討した Ahmed et al. (2008) や、台湾における台風に伴う斜面崩壊を扱った Chou et al. (2010) がある。我が国でも、2000年代末頃から地すべりなどを対象とした観測で UAV が活用され始め (長井・柴崎, 2009)、以降災害調査への活用事例が多い。例えば、深層崩壊を扱った木下ほか (2013) や、西之島火山を扱った飛田ほか (2014) などの研究がある。また、内山ほか (2014a) は、SfM を用いて UAV で撮影した画像の 3次元化を試みているほか、小花和ほか (2014) は、UAV を用いた撮影画像について SfM による DSM を作成した上で、TLS の測量データによる DSM との比較を行っている。

1. 2 リモートセンシングによる地形の把握の災害への応用

1. 2. 1 地震・火山活動

1990年代に入ると、Massonnet et al. (1993) や Peltzer and Rosen (1995) などが、干渉 SAR を用いて地形の変化が面的に捉えられることを明らかにした。これを受け、干渉 SAR で地震や火山活動などに伴う地形変化を扱った研究が、海外を中心に活発化した。地震を対象として干渉 SAR を適用した事例には、2003年のイラン・バム地震のメカニズムを地形変化から明らかにした Fialko et al. (2005) や、ALOS/PALSAR を活用し 2011年の東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動を明らかにした Kobayashi et al. (2011) などがある。火山噴火に関連する火山活動を対象として干渉 SAR を適用した事例には、ハワイ・キラウエア山を対象とした Rosen et al. (1996) や Rowland et al. (1999)、シチリア・エトナ山を対象とした Lanari et al. (1998) や Froger et al. (2001) などがある。また、国内では浅間山の火口内の地形変化を把握した大木ほか (2005) や Urabe et al. (2006) などがある。

他方、写真測量を用いて地形変化を扱った研究は、災害の多い我が国でも地すべり以外を対象としたものは少なかった (林・小口, 2002)。しかし近年、航空レーザや地上レーザを地震研究に活用するケースが増えている。例えば、中田ほか (2008) は航空レーザ測量のデータを用いて活断層変位地形の把握を行ったほか、金田 (2008) は地上レーザを用いて地表地震断層の詳細な形状把握を試みた。また、岩橋ほか (2011) は解像度 2 m の DEM から 2011年に発生した福島浜通りの地震に伴う地表地震断層を抽出した。他方、山本・森田 (2013) は東日本大震災前後の航空レーザ測量で得られた DSM (Digital Surface Model: 数値表層モデル) から被害家屋の抽出を行っており、航空レーザが地震に伴う様々な被害の抽出にも役立つことを示した。

1. 2. 2 地すべり・斜面崩壊

地すべりや斜面崩壊に代表される斜面災害は、地震や火山噴火と並んで我が国における主要な災害である。我が国は世界的にみても降水量が多く、斜面災害が頻発しているため、これまでに豊富な研究成果の蓄積がある。また、斜面崩壊の多寡は傾斜などの地形的要素の影響が大きく、例えば豪雨に伴う崩壊は集水地形となる谷地形で起こりやすい (岩橋ほか, 2008)。斜面災害は地形と関連が深いため、写真測量などのリモートセンシング技術を用いた研究成果が非常に多い。

地すべりや斜面崩壊に関する地形の抽出については、古くから中村 (1932) などが地形図の判読から地形的特徴が得られることを示していたが、1960年代になると空中写真判読による地すべり地の抽出が盛んになった (岡 1964a, 1964b; 丸安 1965 など)。その後、打萩 (1968, 1970) が写真測量による地すべり地の 3 次元的計測手法を提案し、以降写真測量は地すべり地の地形変位計測などに広く活用されるようになった (吉澤ほか 1991, 1994; 宮澤・吉澤, 1998; 小野塚, 1998 など)。海外でも、写真測量を斜面災害に適用した研究は 1960年代頃には行われており、例えば 1958年のラパスの斜面崩壊を計測した Salgueiro (1965) があったが、事例は少なかった。しかし、デジタル技術の進展により 1990年代以降に研究が増加し、コロラドで地すべり移

動量の計測を行った Powers et al. (1996) のような GIS を活用した研究もみられるようになった。2000 年以降には、地すべりや斜面崩壊の抽出と地形変位の計測を、GPS/GNSS やデジタル写真測量などの比較的新しい技術を活用して行った研究が増加した (Mora et al., 2003; Brückl et al., 2006; Yalcin et al., 2007 など)。地形と斜面安定性との関係も検討され、例えば、岩橋ほか (2009) は傾斜及び凹凸度を説明変数とした斜面安定性の分析における DEM の最適解析スケールを検討し、藤本ほか (2011) は DEM の空間分解能の違いが斜面安定解析に及ぼす影響を検討した。

SAR による観測データを用いた地すべりや斜面崩壊の研究も、1990 年代以降に地形変化を扱ったものが海外で活発化した (Fruneau et al., 1996; Singhroy et al., 1998; Squarzoni et al., 2003; Strozzi et al., 2005 など)。また、地上から観測したデータを用いた研究も行われた (Leva et al., 2003; Tarchi et al., 2003 など)。我が国でも、1990 年代には SAR 観測データの実用可能性が認識され (斉藤, 1995)、地すべりに伴う地形変化を干渉 SAR を用いて抽出する研究が行われた。例えば、Kimura and Yamaguchi (2000) や清水ほか (2005) は地すべりが抽出できる可能性を示した。また、宇根ほか (2008) は平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震の地震動に伴う地すべり性変動を抽出した。さらに、鈴木ほか (2010) は月山周辺の既知の地すべり地の地形変化の検知を行った。

航空レーザ測量で得られた DEM による地すべり地の把握の研究は、2000 年代以降国内外で進められている。例えば、海外では Glenn et al. (2006) と Baldo et al. (2009) が地すべり地の抽出や土塊移動を扱った。一方、我が国では八木ほか (2003) がレーザスキャナーによる高精度 DEM が地すべり地の微地形判読に有用なことを示した後に多くの研究が行われた。例えば、土志田ほか (2009) は DEM から作成した地形表現図の判読から斜面崩壊発生の傾向を示した。また、佐藤ほか (2010a) は衛星 SAR による観測データの解析結果との組合せで、地すべりの挙動を百 m 程度の土塊単位で把握できる可能性を示した。さらに、山科ほか (2011) は地すべりに伴う地形変化量の把握を行い、笹原ほか (2012) は斜面崩壊に関連した微地形の抽出を行った。加えて、地上レーザを用いた地すべりに伴う地形変化の把握なども、海外を中心に研究事例が増えている (Bitelli et al., 2004; Abellan et al., 2006; Teza et al., 2007 など)。

また、航空レーザ測量のデータを処理して得られる DEM (DTM) と DSM の活用も、斜面災害を扱う際に有効である。DSM と DEM (DTM) の差分をとると、樹高や建物の高さの情報が得られる。また、DSM を作成する元となるレーザ点群が地表まで透過する割合は、樹冠形状や樹木密度と関係すると考えられる。これは、樹高などの樹木形状の要素が、航空レーザで計測可能なことを示唆する。樹高や胸高直径は根系の最大深さと関係があり (荻住, 1987)、斜面災害の防止には樹木の土壌保持力が効果的である (Waldron, 1977; Abe and Ziemer, 1991; 阿部, 1998 など)。秋山ほか (2007) は斜面崩壊について樹高や樹木密度など抑止効果に関係の強い説明変数を考慮する必要性を述べ、小山内ほか (2011) は樹高や樹木密度と崩壊発生可能性の大小関係について検討を行った。したがって、DEM (DTM) と DSM の比較の結果は斜面災害の多寡と結び付く可能性がある。

1. 2. 3 洪水・浸水

豪雨による洪水、浸水は、水域の拡大という形で地形に現れる。光学センサや SAR などを用いて災害前後に観測されたデータから、水域の拡大の把握などがこれまで数多く行われている（山崎, 2009; 斉藤ほか, 2009 など）。広域の空中写真の利用が困難な途上国などでも、これらの技術は適用可能であるため、例えば 2011 年に大規模な洪水に見舞われたタイを扱った研究なども行われている（澤田ほか, 2013）。

他方、地形は洪水や浸水の起こり方にも影響を与える。これに関連して、リモートセンシング技術で取得した DEM が、洪水シミュレーションに寄与することを示す研究が行われている。例えば、Haile and Rientjes (2005) は航空レーザ測量により得られた DEM を用いて洪水域のシミュレーションを行った上で、DEM の分解能が浸水範囲の推定結果に影響することを示した。

1. 3 地形の把握に関する既存研究の総括と本研究の目的

ここまで述べてきたように、地形の把握やその応用に関して、リモートセンシング技術を応用した研究が幅広く蓄積されてきた。地形の把握やその応用に関する既存研究は、地形モデルなどの基礎的地形データ作成そのものに関わる「基礎的地形データ作成」と、地形モデルを応用した災害をもたらす自然事象のメカニズム解析や、同事象に対する脆弱性の評価などを扱った「地形データを用いた応用」に分けることができる。また、既存研究は、数 km 四方の集落や市町村レベルにとどまるようなものから、数十～数百 km 四方の都道府県や地方レベルに及ぶようなもの、さらには数千 km 四方以上の国や世界レベルに及ぶものまで、様々なスケールを対象としている。近年のスケールの拡大傾向は、リモートセンシングセンサの発展と密接にかかわっており、リモートセンシング技術を活用した研究の発展を整理する上で重要である。これらを踏まえて、「基礎的地形データ作成」と「地形データを用いた応用」の発展段階と、スケールの2つの観点から、地形の把握やその応用を対象とした地形研究について、リモートセンシング技術の活用の推移を図 1.3.1 から図 1.3.3 に整理した。

1980 年代以前の状況 (図 1.3.1) では、1970 年代に LANDSAT が打ち上げられたものの、一連の衛星におけるセンサの分解能が低かったため、地形モデルの作成等への利用は限定的であり、研究は空中写真を用いたものが中心であった。SAR などについても、干渉技術の確立以前は地形モデルの作成は空中写真のほうが優位だったため、活用は限定的であった。ただし、Zebker and Goldstein (1986) により干渉 SAR を用いた地形の把握の実験的な成果が示されるなど、1990 年代以降につながる研究も行われた。

1990 年代 (図 1.3.2) になると、SPOT 衛星の 10 m 分解能センサのデータを用いた DEM の作成が活発化するとともに、合成開口レーダーの分野でも TOPSAR を用いた DEM の作成 (Zebker et al., 1992) が活発化した。また、Massonnet et al. (1993) や Peltzer and Rosen (1995) が干渉 SAR を用いた地震に伴う地形変化を抽出するなど、応用研究も活成化し始めた。航空レーザ測量についても、1990 年代後半はデータ作成に関するまとまった活動が始まった時期である (Hodgson and Bresnahan, 2004)。

2000 年代から現在 (図 1.3.3) にかけては、地形モデル作成に航空レーザを用いた研究が活発化した (Kraus and Pfeifer, 2001; Göpfert and Heipke, 2006 など)。また、SRTM ミッションによる SAR の観測データにより作成された全球 DEM が公開 (Rabus et al., 2003) されるなど、リモートセンシング技術による DEM はより高精度化、広範囲化した。さらに、地すべりの研究に航空レーザ測量データが有効なこと (八木ほか, 2003 など) や、その動きの抽出に干渉 SAR が有用なこと (宇根ほか, 2008 など) が示された。さらに、狭い範囲の地形を詳細に把握する手段として地上レーザの活用が進むとともに (Bitelli et al., 2004 など)、地形に関連する 3 次元情報を取得する MMS の研究も進展した (山野, 2000 など)。

地形の把握や地形の解析の研究は、空中写真を用いた写真測量に端を発し、以降永らく太陽光の地表反射を観測する、受動型センサの画像を用いたものが中心であった。しかし、1980 年代

以降の干渉 SAR の発展、1990 年代以降の航空レーザの発展、2000 年代以降の地上レーザ、MMS の発展などを受け、マイクロ波やレーザを用いた「能動型センサ」による研究が大幅に進んだ。とりわけ、地形モデルの作成や、地形モデルを用いた災害の把握・監視は、能動型センサの重要な応用範囲である。

マイクロ波やレーザなどの能動型センサを用いた応用研究の利点は、以下のように整理できる。SAR は、天候や昼夜を問わず情報を取得できる。特に対流活動が活発で空中写真の撮影や光学センサ画像の取得が困難な熱帯や、火山噴火が活発な場所で、SAR が貴重な DEM の取得手段となる。加えて、地震活動などに伴う微小な地形変化は、干渉 SAR を用いなければ面的な把握はほぼ不可能である。航空レーザは、数十 cm の精度で詳細な地形データが得られ、DEM (DTM) だけでなく、DSM も樹木形状等の把握に利用でき、斜面の安定性評価への活用などが期待される。地上レーザは、航空レーザよりも狭い範囲だがより詳細かつ高精度な地形モデルを作成でき、地表地震断層の詳細な形状把握などにつながる。MMS は、地上から撮影したビデオカメラ画像と結び付けた形で計測対象の 3 次元化が可能で、津波痕跡の計測など地形に関連した研究に応用できる。

このように、能動型センサデータの活用は地形研究に寄与するが、具体的事例に関する既存研究の多くは、SAR や航空レーザなど個別技術をベースとしたものである。既存研究のレビュー論文には、Toutin and Gray (2000) のように DEM の作成手法について SAR に重点を置いて論じたものや林・小口 (2002) のように空中写真を中心とした写真測量について地形学への応用を論じたもの、早川・小口 (2016) のように地上レーザについて地形学への応用を論じたものなどがある。また、個別テーマについてリモートセンシング技術全般を扱ったものも、河川地形を扱った Oguchi et al. (2013) などがある。しかし、地形の把握全般に対してレーダーやレーザなどの能動型センサを広く扱ったものはあまりない。

災害・環境解析のために、リモートセンシング能動型センサの応用を発展させるためには、多様な事象に応じた広範な研究事例を示しつつこれらを総括する必要がある。本研究では、この課題に貢献することを目的とする。本研究では対象とすべき研究を、過去の研究成果を踏まえ以下の 2 つに大きく分類した。

- 1) DEM などの基礎的地形データの作成
- 2) 地形データを活用した応用研究

1) は、SAR による DEM の作成のほか、航空レーザ測量による DEM (DTM) と DSM の作成、MMS 観測データによる浸水深データの作成などが含まれる。干渉 SAR による地形変化データの取得も DEM の差分と考えればここに含まれる。他方、2) は 1) のデータを活用して解析を行ったものが対象となる。自然災害を考える際に、例えば SAR による火山火口内の地形形状の把握を対象とすれば 1) で研究は完結するが、SAR による地すべりに伴う地形変化の把握・監視を対象とすれば、作成した地形データを解析する 2) まで研究を発展させる必要がある。

また、自然事象は様々なスケールを持つため、研究の対象範囲も当然それに対応させる必要が

ある。例えば、地震発生に応じて出現した地表地震断層の段差の把握には数 cm オーダーの高さ精度が必要であるが、対象範囲は数百 m 四方で十分な場合がある。一方、2004 年のスマトラ沖地震が発生した際の地形の影響評価などを概観する場合には、高さ精度は多少犠牲にしても対象範囲を数千 km 以上に広げる必要がある。

これらを踏まえ、自然災害に対する地形の把握と解析を中心に、リモートセンシング能動型センサの応用を発展させるために、以下の 3 つを目的として本研究を実施する。

- 1) SAR や航空レーザなどに代表される能動型センサの 2 つの主領域「レーダー」「レーザ」について、SAR、航空レーザ、地上レーザ、MMS などの多様なセンサをカバーする形で検討を行い、それぞれにおける結果を評価する。
- 2) 「基礎的地形データ作成」と「地形データを用いた応用」の観点をとともに含む形で研究テーマを設定し、それぞれについて事例研究を行う。
- 3) 数百 m 四方の範囲で数 cm の高度差が注目されるマイクロなスケールから、高さ精度は相対的に低くても全球レベルを扱うようなマクロなスケールまで、多様な分解能・スケールを含む形で研究テーマを設定し、それぞれについて事例研究を行う。

さらに、地形の把握と解析が自然災害研究や自然環境学の全般に与える波及効果についても考察し、災害・環境解析に対するリモートセンシング能動型センサの応用の発展について検討する。

(1.3 図表集)

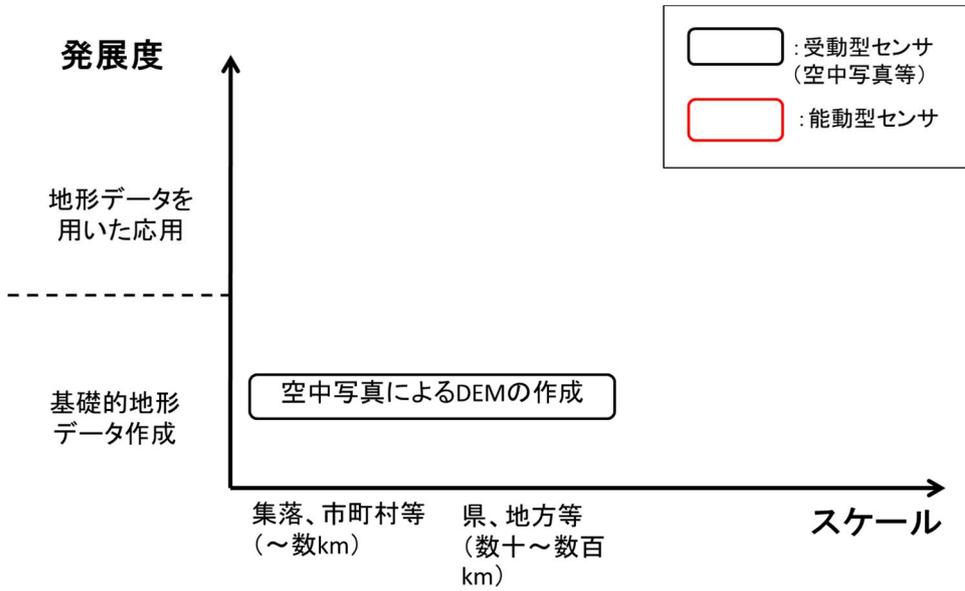


図 1.3.1 1980年代以前の地形研究におけるリモートセンシング技術の活用

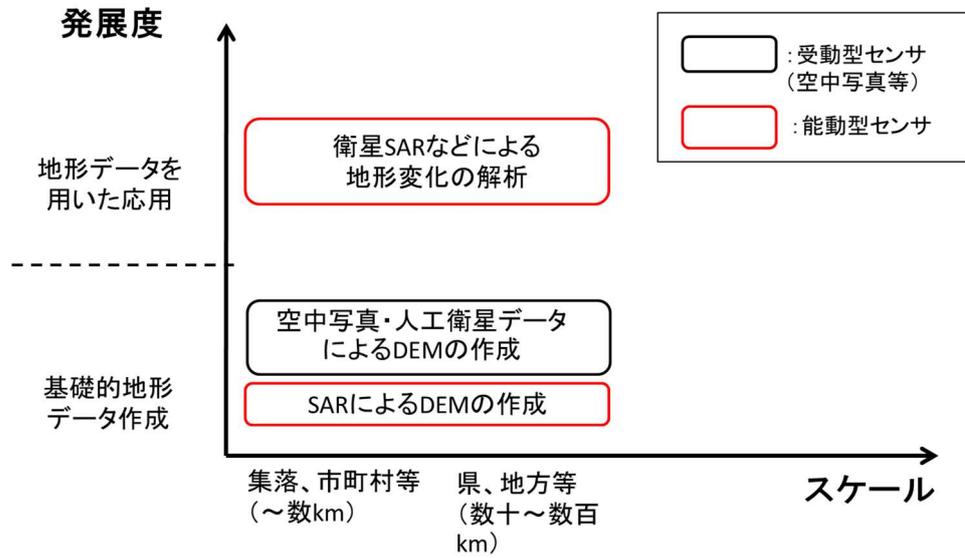


図 1.3.2 1990年代の地形研究におけるリモートセンシング技術の活用

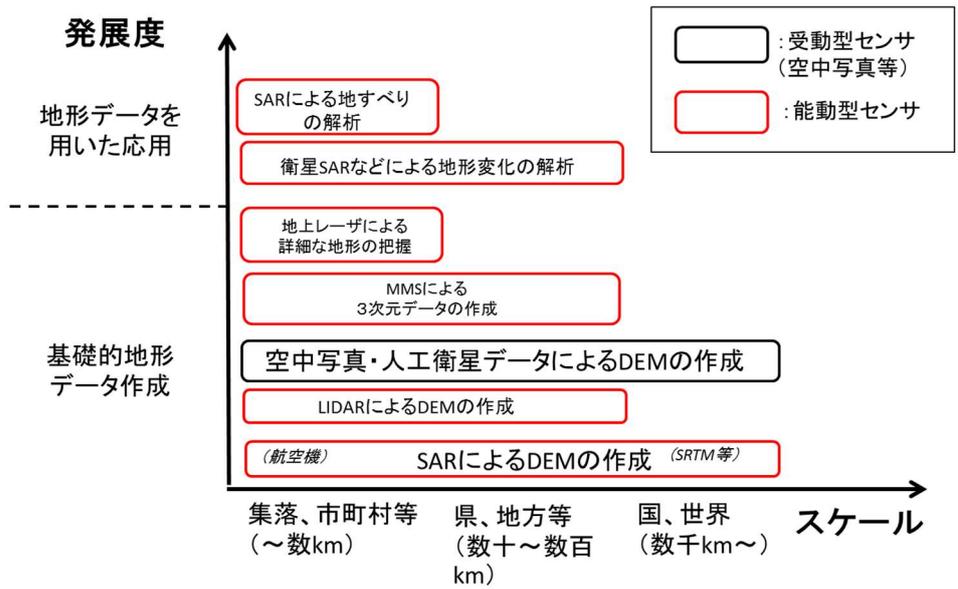


図 1.3.3 2000年代から現在の地形研究におけるリモートセンシング技術の活用

2. レーダーを用いた地形の把握と解析

レーダー (Radar) はアンテナから電波を発射し、観測する対象物に当たって反射された電波を観測するものであり (国土地理院, 2016a)、合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) はレーダーを利用した技術の代表例である。太陽光の反射を主に利用する光学系のセンサは、火山噴火時や曇天時、夜間における観測の制約があり、実際に災害が発生した場合に必ずしも十分なデータが迅速に得られるわけではない。SAR はこのような制約を受けにくいという利点がある。例えば、噴火中の火山の火口内の地形計測や積雲で覆われることの多い熱帯域の地形計測において、SAR を用いた地形モデル作成による地形の把握は非常に有用である。

また、SAR のもう一つの重要な用途として、観測データの干渉処理 (干渉 SAR) により地形変化が把握できることが挙げられる。干渉 SAR を用いて地表の動きを捉えることで、地震に伴う地殻変動、火山活動による山体膨張、地すべり地におけるブロックの移動などが把握可能となり、災害の発生メカニズムの解明につながる。これらを踏まえ、本章ではレーダーによる自然災害を対象とした地形の把握などに関する研究として、SAR を中心に取り扱うこととし、以下の3つの研究成果を示す。

- 1) 衛星 SAR-DEM による地形の把握
- 2) 航空機 SAR-DEM による地形の把握
- 3) 衛星 SAR による地すべりの解析

1) と 2) の研究は、SAR を用いた地形モデル作成について、地形図等への適用を考えた場合に、十分な精度を満たす既存研究が少なく、研究成果の蓄積が必要であることを踏まえて行う。両研究については、衛星と航空機というプラットフォームの違いのほか、分解能 (前者: 8×8 m、後者: 1.5×1.5 m) と DEM の作成手法 (前者: ステレオマッチング、後者: 干渉 SAR) の違いがある。また、筆者が関わった地球地図プロジェクトが SRTM と関連していることを踏まえ、全球スケールを対象とした DEM の議論についても 1) で示す。3) の研究は、地すべり災害が頻発する我が国において、地すべりに伴う地形変化の把握やその監視に対する SAR の活用可能性を検討することが重要であることを踏まえる。また、地形分類において航空レーザ測量による標高データを用いることで、能動型センサの組合せによる地すべりの解析の高度化についても検討する。

以下、本稿で頻出する SAR に関する用語について簡単に説明する。SAR の仕組みや干渉処理の詳細については、村木・下村 (2012)、岡谷・村木 (2012)、国土地理院 (2016a) を参照されたい。

SAR の観測は、飛行機などの移動体から進行方向に垂直な方向にレーダーを照射しながら地表からの反射波を受信する形で、センサと地表との間の距離に相当する「位相」と、反射波の後方散乱の強度に相当する「振幅」のデータを得ることで行われる。センサと地表の位置関係と関連する用語について図 2.0.1 に示した。受信した信号は、センサの移動方向とそれに対して垂直

な方向の2方向で個別に圧縮処理が行われ、それぞれについて分解能が決まる。センサの移動方向は「アジマス方向 (Azimuth direction)」と呼ばれ、それに垂直な方向は「レンジ方向 (Range direction)」と呼ばれる。例えば RADARSAT-1 に搭載されたセンサの 8×8 m 分解能 (Canadian Space Agency, 2011) とは、アジマス方向に 8 m、レンジ方向に 8 m を意味する。分解能におけるレンジ方向の距離は、地表上の距離 (グラウンドレンジ: Ground range) ではなく、センサと地表の間を結んだ空中の視線方向 (スラントレンジ: Slant range) の距離で表現されることが多い。一画素の地表上に投影された大きさが解像度=分解能となるデジタルカメラなどとは異なり、SAR でいう分解能は異なる場所からの反射波が分離できる最小距離を指す。

また、主点からの中心投影で表現される空中写真などとは異なり、SAR はセンサからの距離に基づいて観測を行うため、画像化した際などに独特の幾何学的歪みが生じる (図 2.0.2)。その代表例が「シャドウ (Shadow)」と「フォアショートニング (Foreshortening)」である。「シャドウ」はその名のとおりに、地物がセンサから見えない状態になってしまうことを意味し、急峻な山体の背後に対する観測などで発生する。図では、センサから見て A' までの距離と C' までの距離の間の部分のデータは観測されないため、画像化した場合には黒く映るシャドウとなる。一方、山体の頂上のように高さのある地物は、仮に山がなかったと考えたときと比べてセンサまでの距離が短くなるため、山頂が画像上でセンサ側に倒れ込む。これを「フォアショートニング」と呼ぶ。図では、山頂 B の場合は山体がなければ (B') の位置に計測されるはずだが、B' の位置にずれるフォアショートニングが発生している。さらに、麓よりも山頂のほうがセンサに近くなる逆転現象が起こるような極端な場合には、データ上で山頂が麓に覆い被さるような形となる。このような極端な状況になったものは特に「レイオーバー (Layover)」と呼ばれる。図では、センサから山麓 A までの距離が山頂 B までの距離よりも長くなるため、山麓 A が山頂 B よりも遠くに記録される逆転現象が起こるレイオーバーとなっている。データ上では平地の D の部分も山頂の B の部分も同じ距離となるため、B' と A' の間のデータは D~A と A~B の反射波が重複して表現される。このようなシャドウとレイオーバーは観測位置が特定できないデータとなるため、DEM の作成上の支障となる。

他方、干渉 SAR は複数の観測データの組合せにより、地形モデルの作成や地形変化の把握を行うための手法である。複数の時期に同じ箇所を観測すれば、地震に伴う地殻変動などの地形変化があった際に、衛星と地表の距離の変化として把握が可能である。2 時期間の距離の差は、実際の距離の差の値そのものではなく、それを半波長で割った余り (位相) として観測される。この余りを 0 から半波長 (ALOS/PALSAR の L バンドでは 11.8 cm) まで青→赤→黄→青 (又はその逆) のサイクルに割り当てることで、面的な地形変化量を視覚的に表現できる。図 2.0.3 は秋田県東成瀬村の地すべり地に対して干渉 SAR を実施した例だが、周囲の青色域 (有意な変位なし) に対し、地すべりが発生している箇所 (赤楕円で囲った箇所) では、衛星から最大 9 cm 程度遠ざかる変位があったことが分かる。

地形変化は 2 時期の観測データの比較で把握できるが、積雪や斜面崩壊の発生などがあると大幅に衛星と地表の間の距離が変化するため、半波長以下の余りでしか変化を把握できない干

渉 SAR では地形変化の再現が不可能となる。「コヒーレンス (Coherence、干渉性)」は極端な地表状態の変化の多寡をさし、コヒーレンスが高いとは2時期間の地表状態の変化が小さく、地形変化の把握が適切に行える状態をいう。地表状態の変化に対してレーダーが受ける影響は波長に依存するため、植生の影響を受けづらい長波長の L バンド (ALOS/PALSAR では波長 23.6 cm) の利用が適切である。また、衛星と地表の間の距離の変化を観測するため、2時期で衛星の位置のズレが大きいと、反射波の強度の空間的分布パターンが変化し、やはりコヒーレンスが低下する。衛星と地表の間の視線方向に沿った成分は影響が少ないが、それに垂直な成分 (垂直基線長: B_{perp}) が大きくなると干渉が困難となる (国土地理院, 2016a)。

(2. 図表集)

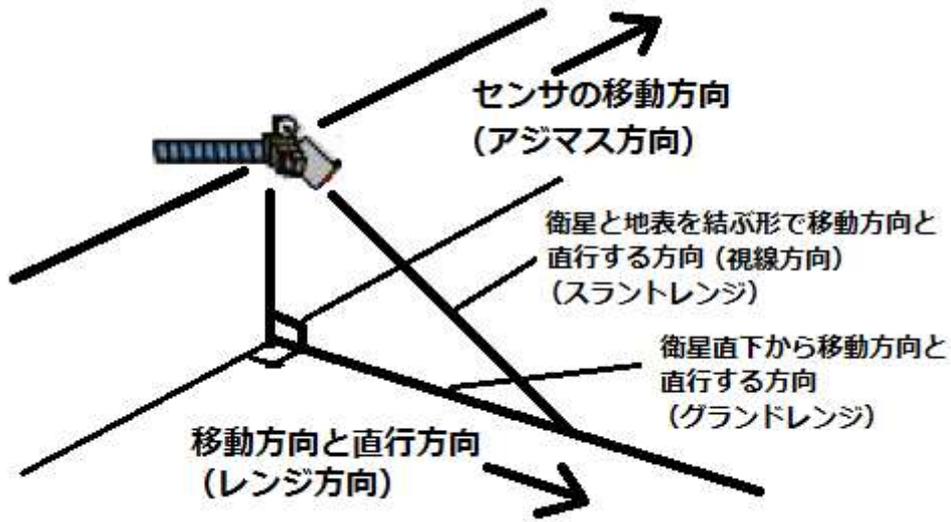


図 2.0.1 SAR 観測の基礎用語

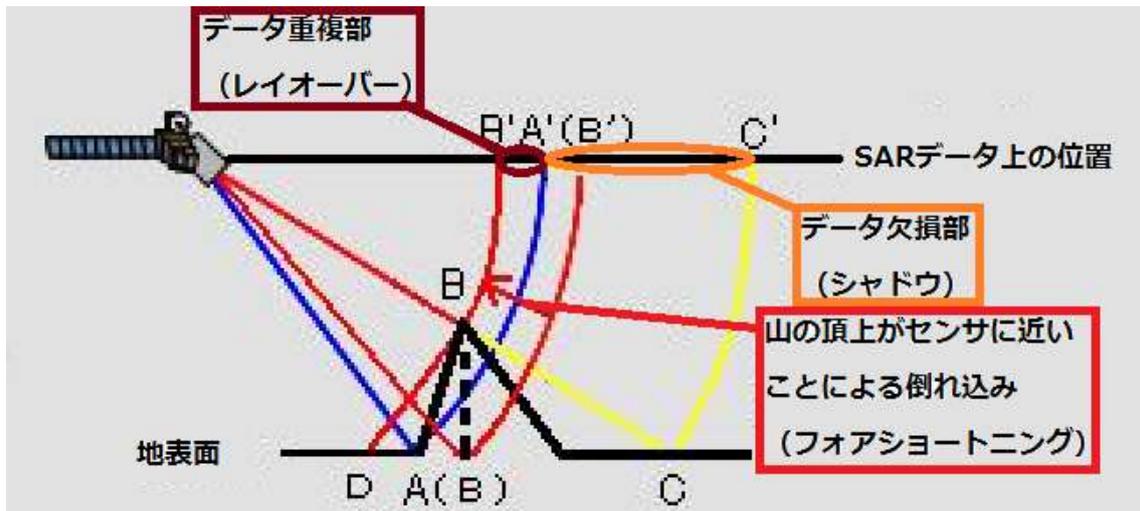


図 2.0.2 SAR 観測における幾何学的関係 (国土地理院, 2016a を一部加工)

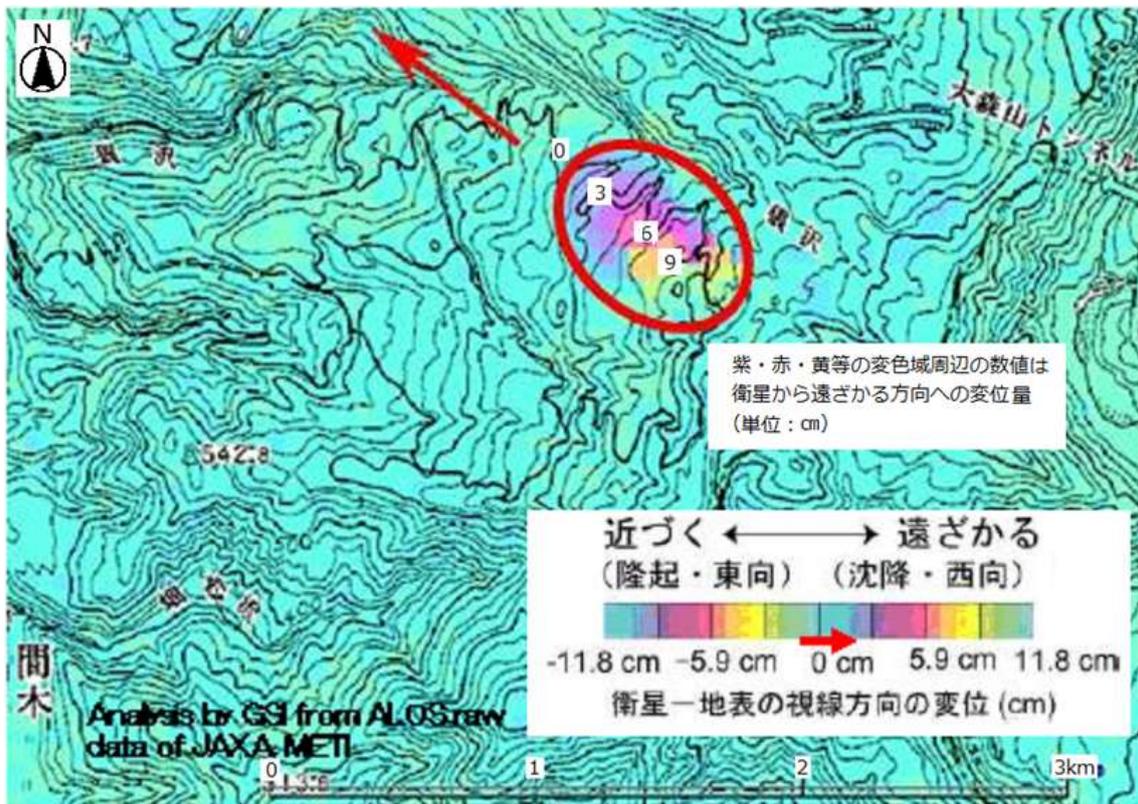


図 2.0.3 SAR 干渉画像による地形変化の把握 (国土地理院, 2011a を一部改変)

2. 1 衛星 SAR-DEM による地形の把握

本研究は筑波山周辺を対象とする。理由は、筑波山に代表される急峻な地形と、その周辺の水田地帯などに代表される平坦な地形が共存しており、DEM の評価に適切と考えられたためである。また、手法は写真測量などで広く用いられているステレオマッチングを用いる。しかし、空中写真の場合とは異なり、フォアショートニングなどの SAR 特有の幾何学的性質があるため、厳密には「SAR の原理に基づいたステレオマッチング手法」となる。データは筑波山周辺を包含する RADARSAT-1 反射強度画像データを使用した。ステレオマッチング手法の導入は、アンラッピングなどの複雑な処理を必要とする干渉 SAR と比較して、プログラミングなどの処理がより簡便であること、データを利用する際に干渉 SAR であれば考慮しなければならない基線長などの要素について考慮せずすむことなどが利点となる。以下、衛星 SAR による DEM の作成に基づく地形の把握について述べる。

2. 1. 1 手法

本研究での DEM の作成の対象を図 2.1.1 に示す。使用した RADARSAT-1 データの諸元と反射強度画像はそれぞれ表 2.1.1 と図 2.1.2 のとおりである。RADARSAT-1 の Fine Beam Mode のデータ自体の分解能は 8×8 m であるが、3.125 m 四方に変換された Path Image Plus データが提供されており、本研究ではこのデータを用いた。細分化により分解能が向上するわけではないが、データ密度を細かくしたほうが、画素寸法と分解能の不一致から来るデータ劣化をより避けられる利点がある。

次に、対象域の RADARSAT-1 反射強度画像を図 2.1.2 に示す。反射波は位相と強度の情報を含んでおり、例えば RADARSAT-1/Path Image Plus/Fine Beam のプロダクトでは、強度情報を 16 ビット化したものが提供されている (RADARSAT International, 2000)。すなわち、強度情報は 2^{16} 段階 = 0~65535 の値として表現される。しかし、BMP など汎用の画像フォーマットでは明暗は 0~255 の 2^8 段階で表示することが一般的であるため、図 2.1.2 でも同様の補正を行い表現している。ただし、ステレオマッチングは 2 時期の反射強度画像の明暗の空間的分布パターンに関連によって行うため、特定の画素の反射強度の絶対値よりも、周囲と比較した際の相対的な反射強度の大小 (明暗の差) が重要である。このため、SAR 反射強度画像を扱う際には、相対的な明暗の空間的分布パターンに注目しながら処理を行った。また、SAR 反射強度画像データはノイズが大きいいため、メディアンフィルターで補正した。

SAR におけるステレオマッチング手法は、2 つの空間的に重なり合った画像から同一箇所を検出し、2 つの画像の観測 (撮影) 位置の情報から立体化する点では空中写真などと同様である。しかし、SAR の反射強度画像に映り込む地物の画像上の位置は、観測時点におけるセンサと地物の間の距離で決まる点が、空中写真とは大きく異なる。図 2.1.2 の画像の場合は筑波山周辺を西側 (画像では左側) 上空から東側に向けて観測を行っている。もしも、観測地域が平坦ならば、映り込む地物の位置関係はほぼ不変である。例えば、画像左上にある暗部 (「つくしこ調整池」

に相当)の形状は地形図等で確認されるものに近い。一方、筑波山の山頂付近では、山頂が左側(西側)に倒れ込むフォアショートニングが発生している。また、センサに向かった斜面(図 2.1.2 では西側斜面)のレーダー反射強度は大きくなるため、図 2.1.2 に示された山頂(女体山の山頂)の右側(東側)の部分は暗く、それよりも左(西)にある男体山の山頂から左側(西側)の部分は明るく見える。

フォアショートニングで山頂などがセンサ側にずれる量は、センサ位置、山頂などの地物の位置、山体がなかったとした場合の標高の3つの関係で一義的に求まる(図 2.1.3)。センサと地物の間の水平距離が長くなればなるほど、フォアショートニングの影響は小さくなる。このため、全く同じ範囲を観測したとしても、SAR 反射強度画像では、センサと地物の水平距離が短いほうが、山頂などの高さがあるものがセンサ側にずれて映る。地物からみた1回目と2回目のセンサの観測位置までのそれぞれの距離に十分な差があれば、同じ山頂でもフォアショートニング量が異なる。このため、2つの観測結果を比較してズレが大きい箇所は山地で、ズレが小さい箇所は平地と分かる。フォアショートニング量の差は、センサ位置と地物の位置関係から幾何学的に標高に置き換えられるため、2つの画像間で映っている地物が同定できれば標高が算出可能である。

次に、地物の同定(以下、「マッチング」と呼ぶ。)の手法について示す。通常用いるマッチング手法では、①2つの画像にそれぞれ相関窓(5×5画素など)を設定し、②片方の相関窓を固定しつつもう片方の相関窓を移動し、③2つの相関窓の反射波強度の相関係数を計算し、④その値が最大になったところについて2つの画像は同じ位置を指していると推定する、というプロセスをとる。この手法は原理的には正しいが、SAR 反射強度画像では空中写真などとは違い、山体や建物などの地物のエッジがあまり強調されない。このため、①から④の単純な相関を取る手法では、付近の類似の反射強度パターンを同定誤認し、筑波山周辺の地形の概形が再現できなかった。この問題を解決するため、本研究においては多段階マッチングの手法を用いた。

多段階マッチングのイメージを図 2.1.4 に示す。この手法では、元の画像の画素サイズを2倍、4倍、8倍…と大きくしたものを作成し、画素が拡大された画像同士から徐々に画素が小さいものに合わせていく形で相関を取る。この手法ならば、明部となる西側斜面同士や暗部となる東側斜面同士など、大局的な画像の明暗の傾向を踏まえながら大枠でマッチングしつつ、最終的に元の画素サイズ同士まで微調整を行えるため、マッチングのミスが起きづらい。

2. 1. 2 結果及び考察

作成したDEMに基づく等高線を図 2.1.5 に示す。等高線の間隔は100 m、背景の地形図の等高線は10 m 間隔である。計算される標高値は、原理的には図 2.1.3 のフォアショートニングの仕組みから、2つの観測データについて、①データに付随する画像四隅の座標情報、②レーダー反射波の観測位置、③フォアショートニング量の観測間の差異、を用いて計算可能である。しかし、実際には①や②には誤差が含まれるため、2つの画像上で筑波山北側の標高500 m 付近に基準点を設けて補正を行った。また、今回用いたデータについて①②に基づいた③のフォアショ

ートニング量の差異が最小（1画素分=3.125 m）であった場合、標高値の差異が16 m程度と求められるため、本手法での標高差の検出限界は16 mとなる（Okatani et al., 2000）。

次に、DEMの精度を検証するため、空中写真から作成したDEMを真値とした比較を行う。空中写真のDEM化にはDPW（Digital Photogrammetric Workstation）による自動マッチングを用いた。精度検証の手法は以下のとおりである。まず、DEMを作成した範囲において300 m程度の間隔で200点を超える検証点を設定し、各検証点で空中写真によるDEMとの標高差を計算した。結果として、標高差の小さい点は筑波山の西側斜面のほか北側や南側の斜面でも多く確認されたが、山頂付近から東側の部分や、南西に広がる水田地帯ではほとんど確認されなかった（Okatani et al., 1999a）。各検証点における標高差を集計した結果は図2.1.6のとおりであり、空中写真によるDEMを真値とした場合の誤差は、平均で30 m程度、標準偏差で40 m程度となる（Okatani et al., 2000）。RADARSAT-1の解像度が8 mであり、この値をフォアショートニング量の差異とした場合、標高値の差異が40 m程度と求められる。このことは、今回作成したDEMの精度がRADARSAT-1の能力を適切に引き出したことを示す。

一方、誤差が大きかったところについて、水田地帯では建物や山腹のように強い反射強度を示すような地物が少なかった。8 m程度の分解能では特徴的な明暗のパターンが出づらいため、画像の明暗パターンの相関をとるマッチング手法には不利であったと考えられる。また、筑波山頂付近から東側の部分では、レーダーの照射と相対しないため反射波が様に弱く、水田地帯の場合と同様に明暗のパターンが出づらいことが影響したと考えられる。しかしながら、作成されたDEMは800 mを超える筑波山の地形形状を概ね表現できており、一部の箇所を除いては適切に地形を再現できたと考える。

今回作成したDEMの精度は、地形図の許容誤差が等高線間隔の1/2程度であることを考えれば、1:50,000地形図（等高線間隔: 20 m）には及ばないが1:200,000地勢図（等高線間隔: 100 m）には相当する。例えばSRTMの成果などにより構築された全球標高データGMTED2010の誤差は標準偏差で25~42 m（30秒データの場合; USGS, 2010）であり、今回得られた成果もこれと比較して遜色ないと考える。また、図2.1.3の衛星Aと衛星Cのような位置が遠い組合せを用いれば、標高差の検出限界をより小さくすることが可能である。RADARSAT-1データの場合も、観測時の入射角の差を今回の5°程度から10°程度にまで拡大可能である。標高差の検出限界の縮小により30 m以下の標準偏差誤差を実現できれば、GMTED2010の7.5秒データの標準偏差誤差（26~30 m）に相当し（USGS, 2010）、更なる適用範囲の拡大が期待できる。

2. 1. 3 広域スケールのSAR-DEMとその活用方策

RADARSAT-1から作成したDEMは、スケールが数km四方程度と比較的小規模であった。しかし、一方で2004年末に発生したスマトラ沖地震に伴う津波のように、被害が広域に及ぶ災害の検討でも地形情報は重要である。このため、より広域を対象としたデータが必要である。

全球レベルのDEMは、かつてはGTOPO30（USGS, 1999）などが広く使われていた。しかし、より高精度なSRTMによる成果の公表・提供開始に伴い、これを用いたものに置き換わっ

ていった。その代表例が地球地図である。地球地図プロジェクトは、各国の国家地図作成機関の協力により全球の基盤的な地理情報を構築する取組であり、標高などのグローバルな地理空間情報を公開・提供した (Okatani et al., 2006; 図 2.1.7 左図)。全球の標高データには、第1版では GTOPO30 が用いられたが、第2版では SRTM の成果などから構築された GMTED2010 が採用された (図 2.1.7 右図)。

世界的な大規模災害の発生の際に、被災地周辺の地形などを示した図が 2004 年のスマトラ沖地震以降作成され (図 2.1.8)、地球地図標高データなどが利用された (国土地理院, 2015a; 図 2.1.7 右図は、2015 年 12 月のインド南部の洪水に関連して公開されたもの)。また、国連人道問題調整事務所 (UNOCHA: United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs) の災害関連サイト (refiefweb; UNOCHA, 2015) を通じて地形情報を含む地図が提供されており、防災分野における全球規模の DEM の活用が図られている。

地球地図プロジェクトは、2016 年 8 月の第 23 回国際運営委員会において、その目的はほぼ達成されたとの理解のもと、ISCGM (地球地図国際運営委員会: The International Steering Committee for Global Mapping) の解散と地球地図データの国連地理空間情報課への移管が決議された。この結果、20 年間に渡る地球地図プロジェクトは完了したが、地球地図データは今後、国連における諸活動に使われることが期待されている (国土地理院, 2016b)。

2. 1. 4 まとめ

衛星 SAR データから作成される DEM の高精度化について、ステレオマッチング的原理を用いて検討した。その結果、RADARSAT-1 に搭載されたセンサの 8 m 分解能と、5° 程度の入射角差という条件下において、急峻な地形を有する筑波山周辺でも、標準偏差誤差で 40 m 程度の精度を確保できることを示した。この誤差は利用したステレオペアで理論上達成できる値に近いと考えられ、SAR を用いて作成した DEM の高精度化について一定の成果が得られたと考える。

このように、本研究成果は地形モデルの構築に関する基礎的な貢献と位置付けられる。特に、赤道周辺など曇天時が多く、空中写真の撮影が困難な地域で、航空機 SAR の機動的観測と比較してより低コストに地形を把握する手段を与える。また、SRTM Plus の更新が現在続いており、今後も NASADEM の整備などのより高精度な全球的地形モデルを作成するミッションが予定されている (Jet Propulsion Laboratory, 2015)。本研究をはじめとする一連の研究成果が、光学センサでは把握困難な地域の災害把握や、災害をもたらす自然事象のメカニズム解析などにますます貢献していくことが期待される。

(2.1 図表集)



図 2.1.1 対象地域の位置（地理院地図）及び周辺の地形図（1:25,000「筑波（1994年修正）」）
右図の枠線は図 2.1.2 の画像範囲及び図 2.1.5 の解析範囲を示す。

表 2.1.1 使用した RADASAT 画像の諸元

観測日	1998年12月22日	1998年12月29日
軌道番号	16347	16447
観測方向	Ascending (北行軌道)	
ビームモード	FINE 4 NEAR	FINE 1 FAR
プロダクト形式	PATH IMAGE PLUS (SGX)	
画素サイズ	3.125x3.125 m	
解像度	8x8 m	
画像中心座標	36° 13' N	36° 12' N
	140° 11' E	140° 9' E
入射角	44°	39°

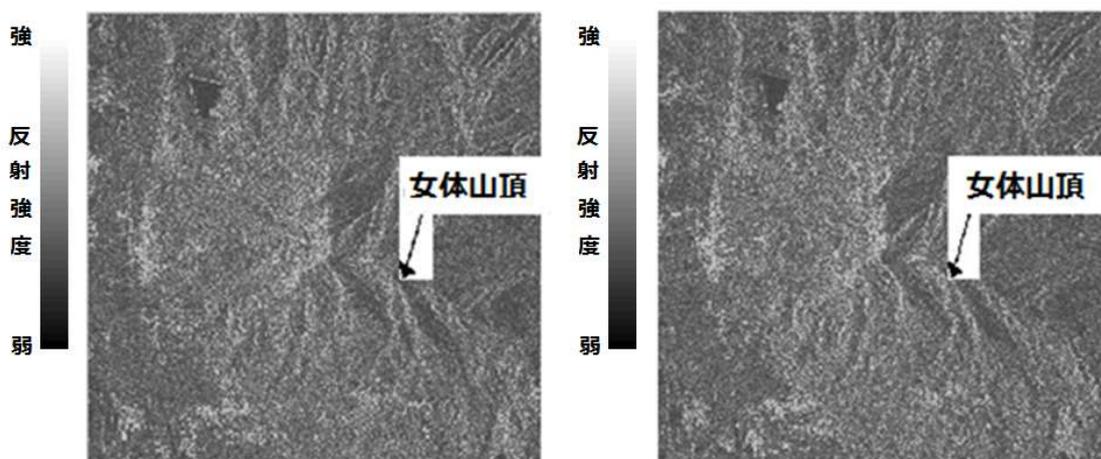


図 2.1.2 筑波山周辺の RADARSAT 反射強度画像（左: 1998.12.22 右: 1998.12.29）
白く見えるところが後方散乱が強い。

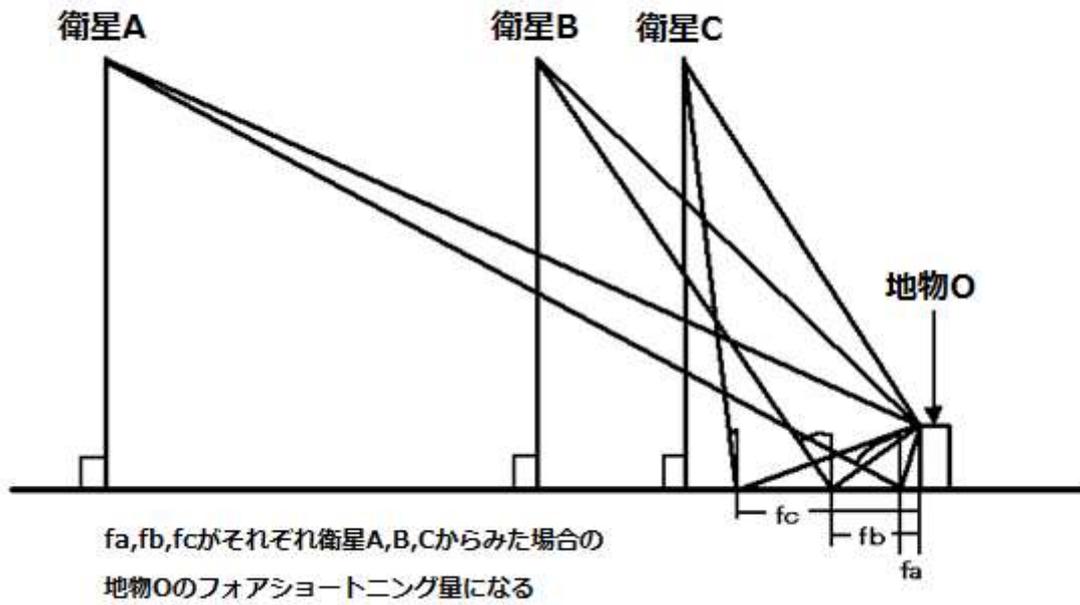


図 2.1.3 SAR におけるフォアショートニング

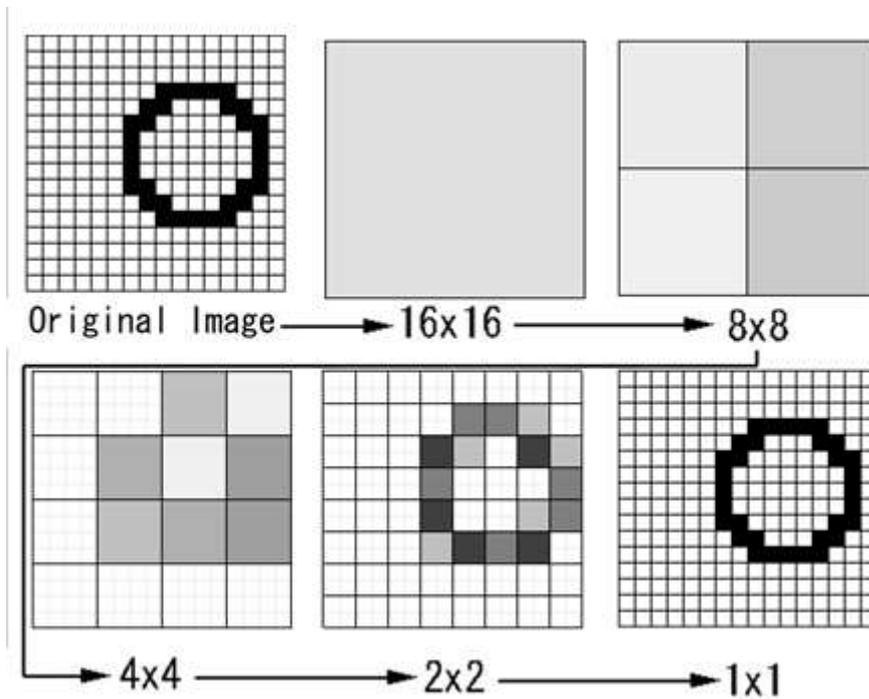


図 2.1.4 多段階マッチングのイメージ

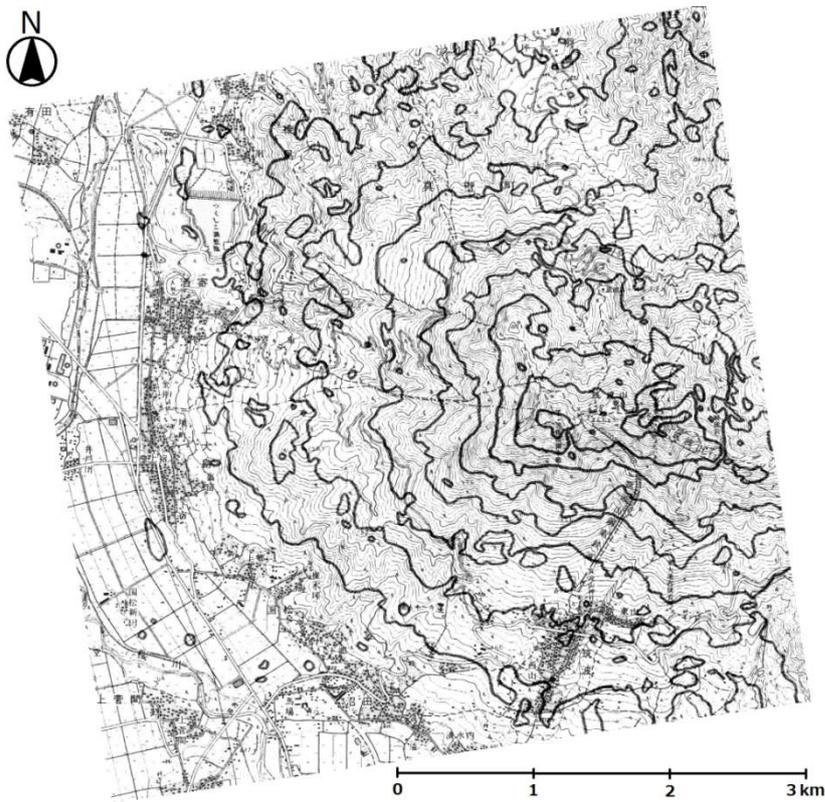


図 2.1.5 ステレオマッチングにより作成した DEM に基づく等高線図
 図中の太曲線は 100 m 間隔の等高線を示す。

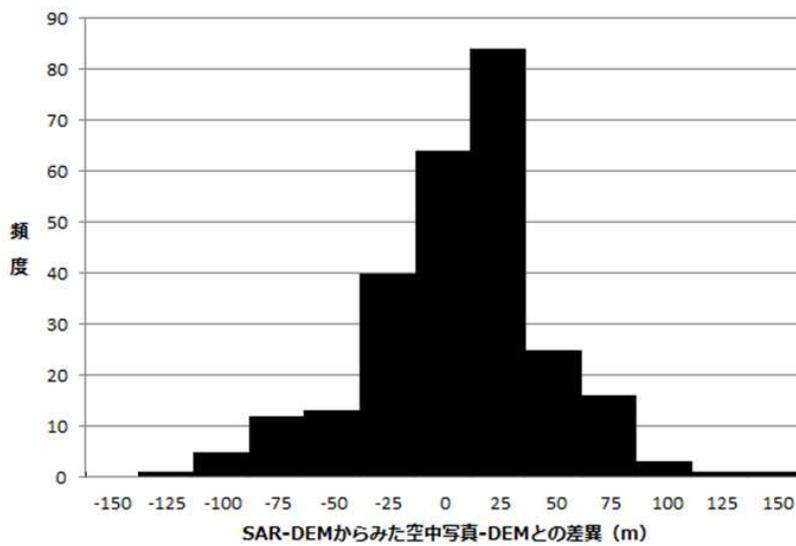


図 2.1.6 SAR-DEM と空中写真-DEM との差異 (Okatani et al., 1999a を一部改変)

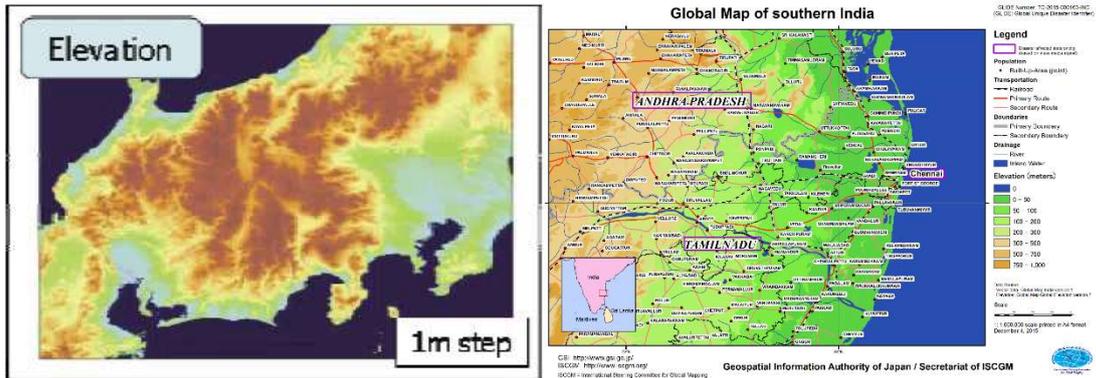


図 2.1.7 地球地図標高データ

(左図 : Okatani et al., 2006 右図 : 国土地理院, 2015a)

左図が従前の地球地図日本のデータ (Global Map Japan © Geospatial Information Authority of Japan)。右図は GMTED2010 を含む地球地図全球版標高第 2 版を背景としたインド南部の地図。

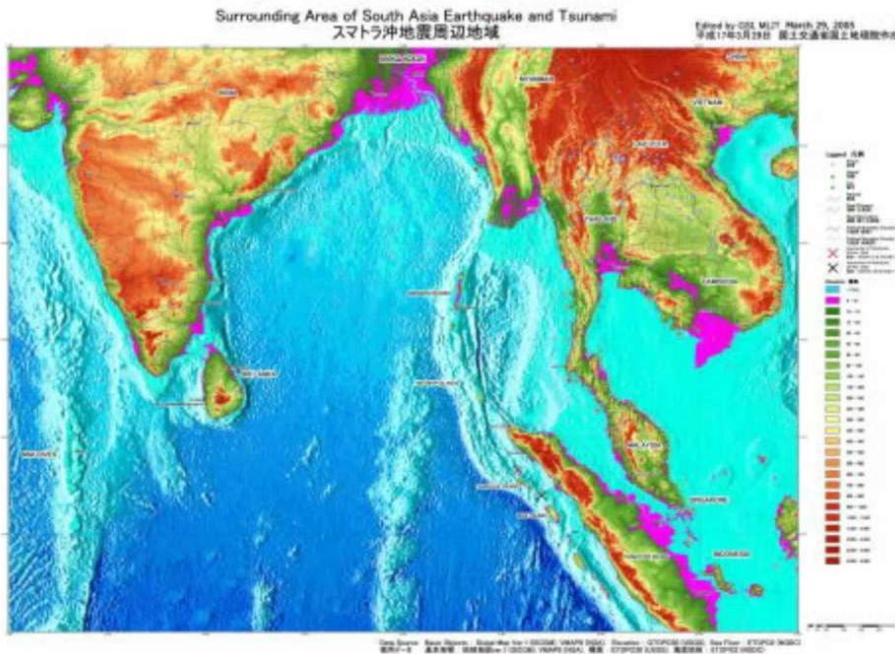


図 2.1.8 スマトラ沖地震周辺地域 (国土地理院, 2012b)

データは、基本地物について地球地図 Ver.1 (ISCGM) 及び VMAP0 (NGA)、標高について GTOPO30 (USGS)、海底地形について ETOPO2 (NGDC) をそれぞれ使用した。

2. 2 航空機 SAR-DEM による地形の把握

この研究では、衛星 SAR の場合と同様に筑波山周辺を対象地域に設定するとともに、伊東市付近を追加する。伊東市付近では、画面のほぼ中央に位置する小室山（標高 321 m）など標高が高い場所もあるが、全体として傾斜は緩やかであり、航空機から見えない部分は少ない。一方、筑波山周辺では、衛星 SAR と比較して低空の飛行機からの観測では入射角がさらに大きくなるため、単一の画像では多くの影ができ、DEM の欠損部が多くなると予想される。DEM の補間を行う必要性に関して対照的なこれら 2 か所の観測結果に基づき、航空機 SAR による DEM の作成に基づく地形の把握について述べるとともに、DEM の補間を行う意義と必要性についての検討を行う。

2. 2. 1 手法

本研究の対象地域を図 2.2.1、周辺の地形図を図 2.2.2 に示す。伊東市付近（北緯 34 度 56 分 36 秒、東経 139 度 7 分 56 秒）および筑波山山頂付近（北緯 36 度 13 分 25 秒、東経 140 度 6 分 5 秒）を中心としたそれぞれ 5×5 km 程度の範囲を対象として、国土地理院所有の GSI-SAR を用いて観測したデータに基づき、再生画像の作成と DEM の取得を行った。観測は伊東市付近では 1999 年の 2 月、筑波山周辺では同年 10 月に実施した（表 2.2.1）。得られた画像の分解能は約 1.5 m である（小荒井, 1999）。この分解能は、過去に打上げられた RADARSAT-1 の 8 m や ALOS/PALSAR の 10 m などと比較して高く、現在高分解能衛星として運用され 3 m 以下の分解能を持つ RADARSAT-2、Terra-SAR-X、ALOS-2（Canadian Space Agency, 2011; DLR, 2014; 宇宙航空研究開発機構, 2014）などと比較しても遜色がない。

観測データによる DEM の作成には、NEC 製の航空機 SAR 対応プログラムを使用した。基準点入力以外の部分は、ほぼこのプログラムにより自動的に計算処理される。例えば、伊東市付近のケースについて処理した結果は、図 2.2.3 及び図 2.2.4 のように示される。図 2.2.3 は、航空機 SAR により観測される反射波を構成する位相と振幅のうち、振幅の情報を処理して得られた反射強度画像である。画像の明暗は地表から反射したマイクロ波の強度を示し、明るい部分は反射強度が強い部分である。観測は北北東方向から行われており、図の上方も北北東方向である。他方、図の中央からやや右にある円形の地物（小室山）の下方（南南西側の斜面）など、所々暗い部分もある。航空機からみて山体の陰などになっている部分からは反射波が届かないシャドウとなるため、画像では暗部として認識される。

今回用いた航空機 SAR は、発射したマイクロ波を 2 つのアンテナで同時に受信する仕組みであるため、アンテナごとにそれぞれ位相と振幅の情報が得られる。例えばある地点について標高が 0 m であった場合と 100 m であった場合では、2 つの受信データ間における位相差の情報に差異が生じる。この位相差の差異とマイクロ波の発射位置、および 2 つのアンテナの受信位置について、計算処理を行うことで観測範囲の高度分布が得られる。この手法が干渉 SAR であり、作成した DEM が図 2.2.4 である。

DEMの精度検証には、1994年11月に伊東周辺を撮影した1:25,000空中写真と、1998年10月に筑波山周辺を撮影した1:30,000空中写真を用いた。1:30,000の空中写真は1:10,000地形図を作成するのに十分な精度を持っており、1:10,000地形図の山地における等高線の間隔は4mであるため、精度は等高線間隔の半分すなわち2m以下であると考えられる。以下の航空機SARにより作成したDEMの精度検証は、空中写真により作成したDEMを真値として行う。

2. 2. 2 結果及び検証

伊東市付近及び筑波山周辺について作成したDEM画像を、それぞれ図2.2.4と図2.2.5に示す。伊東市付近のDEM画像はシャドウの部分が比較的少なかったため、このDEMと空中写真から作成したDEMとの比較を行った。その結果を図2.2.6に示す。20m間隔の等高線が概ね同じ場所に描かれている。DEMの精度は標準偏差誤差で10m程度である(岡谷ほか, 2001)。この値は、地形図の許容誤差が等高線間隔の1/2程度であることを考えれば、1:50,000地形図(等高線間隔: 20m)に準じるものであり、航空機SARにより詳細なDEMが作成できることを示している。

一方、筑波山の4方向のDEM画像では、図2.2.5の上方に示したとおり、黒く表示されるシャドウがそれぞれ広がっている。シャドウはデータ欠損部であり、これではDEMとして不十分であるため、図2.2.5で示した合成を行った。その結果、データ取得率は単方向の4割程度から9割程度に上昇し、合成したDEMの精度も標準偏差誤差で9m程度と、伊東市付近とほぼ同様の結果が得られた。これは、複数方向の観測データの合成で、シャドウ、オーバーレイなどのSAR特有の性質から来るデータ欠損を大幅に減らせることを示している。また、伊東市・筑波山双方のDEMの精度から、標高精度2m以下の空中写真によるDEMを真値とした検証方針は妥当と考える。

Li and Goldstein (1990) は、理論的に得られるDEMの精度がスラントレンジ長、2つのアンテナ間を結ぶ基線の水平及び垂直成分、センサの高さ、位相のそれぞれの精度に影響されることを指摘している。これを踏まえると、今回の観測で用いた65°程度の入射角では5m程度の値と求められる。得られたDEMの標準誤差は、ややこの値を上回っているが、誤差は谷筋など反射波が届きづらいところで大きく、これが理論上の誤差と実際の誤差の差の主因と考える。さらに、多方向観測データに基づくDEMの合成は、筑波山のようにデータ欠損が多いところでは、その削減に効果があり、データが存在する箇所同士の結合では精度向上の効果が現れる(岡谷ほか, 2001)。

2. 2. 3 考察及び成果の活用方策の検討

航空機SARを用いたDEMの作成は、その機動性から例えば噴火中の火山の火口内の地形発達や、豪雨に伴う山地での斜面崩壊の把握に威力を発揮すると想定される。しかし、山地を対象とした観測では、SAR特有の歪みが発生するため位置的に大きなズレが生じる。このため、地形図などの既存資料と観測で得られたSAR反射強度画像を単純に重ねると、被害のマッピング

の精度が低下してしまう。幾何学的性質が異なる空中写真でも、そのまま地形図等と重ねると山地などにおいて歪みを生じるため、真上からみた画像に変換する正射化（「オルソ化」とも言われる）を行う。SAR 反射強度画像でも、起伏が大きい場所では歪みが大きいため、地形図等との重ね合わせにはオルソ化が必須である。

そこで筆者らは、山地における災害把握等を念頭に置いて SAR 反射強度画像のオルソ化を実施し、空中写真をオルソ化した画像と重ね合わせた（岡谷ほか, 2001; 図 2.2.7）。オルソ化後の SAR 反射強度画像の水平位置は、空中写真と比較して、誤差の絶対値平均が 8 m、誤差分布の標準偏差が 4 m 程度である。他の重ね合わせ対象としては、地形図などの地図が想定されるが、災害前の空中写真があれば崩壊対象の斜面位置の把握などがより容易になる。

2. 2. 4 まとめ

地形が比較的緩やかな伊東市付近と、比較的急峻な筑波山周辺において、航空機 SAR による DEM の取得を行った。特に、地形が急峻なためにデータ欠損の大きい筑波山については、東西南北の全方向の DEM について合成を行い、その成果を検証すると共に、オルソ画像の取得などその応用的利用方法について検討した。結果は以下のとおりである。

1) DEM の取得・合成

得られた DEM の標準偏差誤差である約 10 m という値は、5 万分 1 地形図の等高線の精度に準じるものであり、地形図作成への航空機 SAR の適用可能性を新たに示したと考える。また、複数の方向からの観測データの合成により、シャドウ、オーバーレイなどの SAR 特有の性質から来るデータ欠損を大幅に減らせることが示され、噴火活動中の火口内の地形計測等にも航空機 SAR が有効であることを示した。

2) DEM の応用的利用

SAR 反射強度画像と DEM からオルソ画像の取得を行い、空中写真をオルソ化したものと比較した結果、誤差の絶対値の平均は 8 m、誤差分布の標準偏差は 4 m 程度であった。これは 2 万 5 千分 1 地形図の水平位置精度に相当する。また、空中写真や地形図など他の要素を加えることにより、判読性の向上や変化抽出の効率化も可能と考えられる。

このように本研究は、急峻な火山などでも地形図作成の精度に準ずる DEM が作成できることを示した。干渉 SAR による DEM の作成については、新たに打ち上げられた RADARSAT-2、TerraSAR-X、ALOS-2/PALSAR-2 がそれぞれ 3 m 以下の分解能を持つため、衛星 SAR でも同様の精度の DEM が実現可能になってきていると考える。近年の航空機 SAR の適用範囲は、その機動性から火山噴火に伴う火口内の地形の把握が中心となっており、浅間山を扱った大木ほか（2005）や Urabe et al.（2006）、新燃岳を扱った下野ほか（2011）などの事例がある。本研究の成果は、衛星 SAR・DEM による地形の把握の研究と同様に、地形モデルの構築に関する基礎的な貢献と位置付けられる。特に、航空機が機動性を有するため、災害発生時等における活用が期待される。

(2.2 図表集)



図 2.2.1 伊東市と筑波山の位置 (地理院地図)

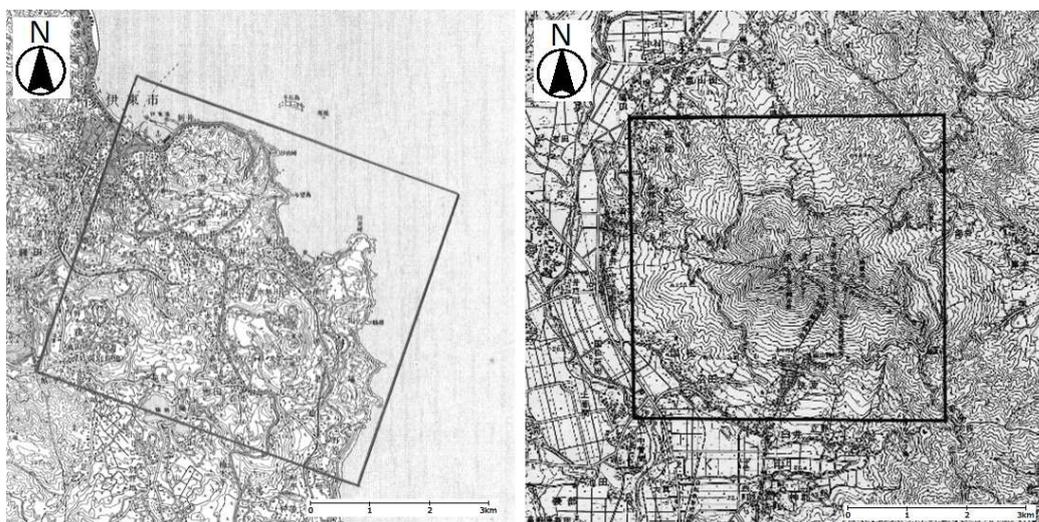


図 2.2.2 伊東市付近及び筑波山周辺の地形図

(地形図 1:50,000「伊東 (1992 年修正)」及び「真壁 (1996 年修正)」)

左図の枠線は図 2.2.3 及び図 2.2.4、右図の枠線は図 2.2.5 の範囲をそれぞれ示す。

表 2.2.1 観測諸元

観測地域	伊東市付近	筑波山周辺
観測年月	1999年2月	1999年10月
天候	晴れ、西風強	晴れ
飛行高度	3600 m	3200 m
オフナディア角	68°	65°
偏波	水平偏波送信/水平偏波受信(HH)	
分解能	アジマス1.5 m/レンジ1.5 m	

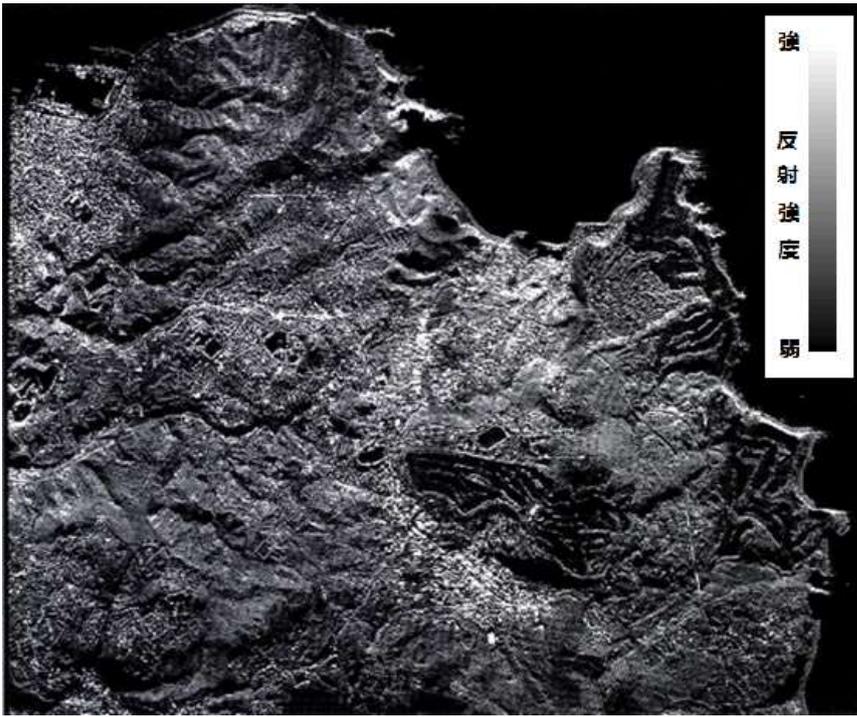


図 2.2.3 SAR 再生画像 (伊東)

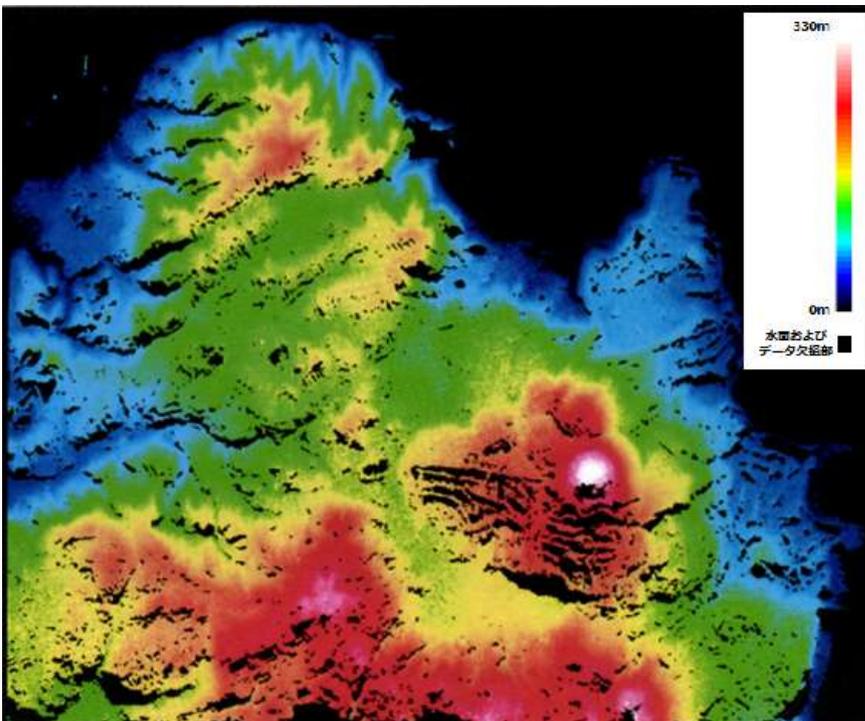


図 2.2.4 DEM 画像 (伊東) (黒い部分は水面及びデータ欠損部)

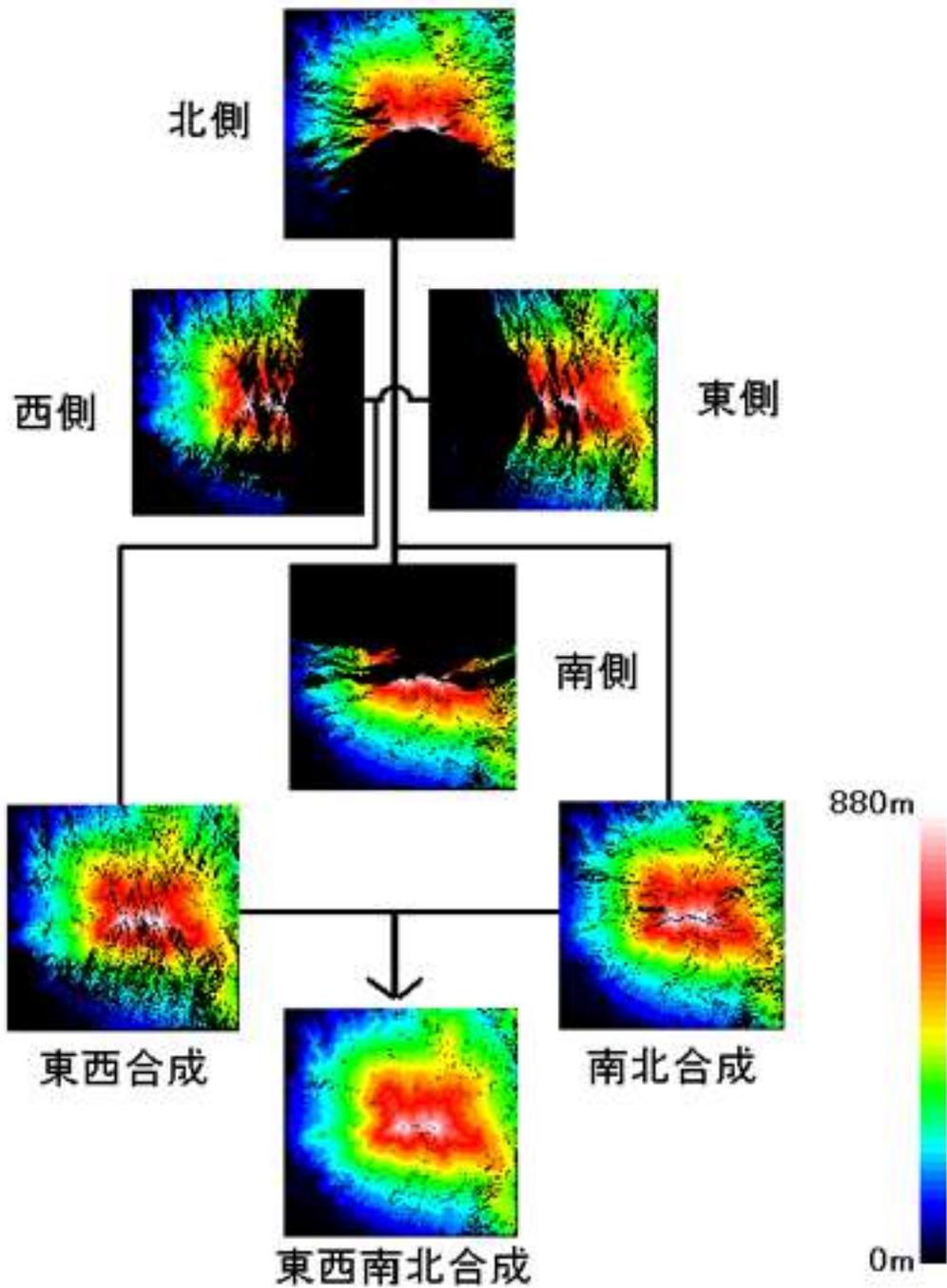


図 2.2.5 各方向からの航空機 SAR 観測データによる DEM とその合成過程 (筑波山)

(岡谷ほか, 2001 をカラー化)

すべての図は北が上方で、画像の枠の一边はいずれも約 5 km である。



図 2.2.6 SAR-DEM と空中写真-DEM の比較 (Okatani et al., 1999b)

濃い黒線は SAR-DEM の等高線で、図 2.2.2 左図の枠線内の範囲について描写した。
薄い黒線は空中写真-DEM の等高線である。

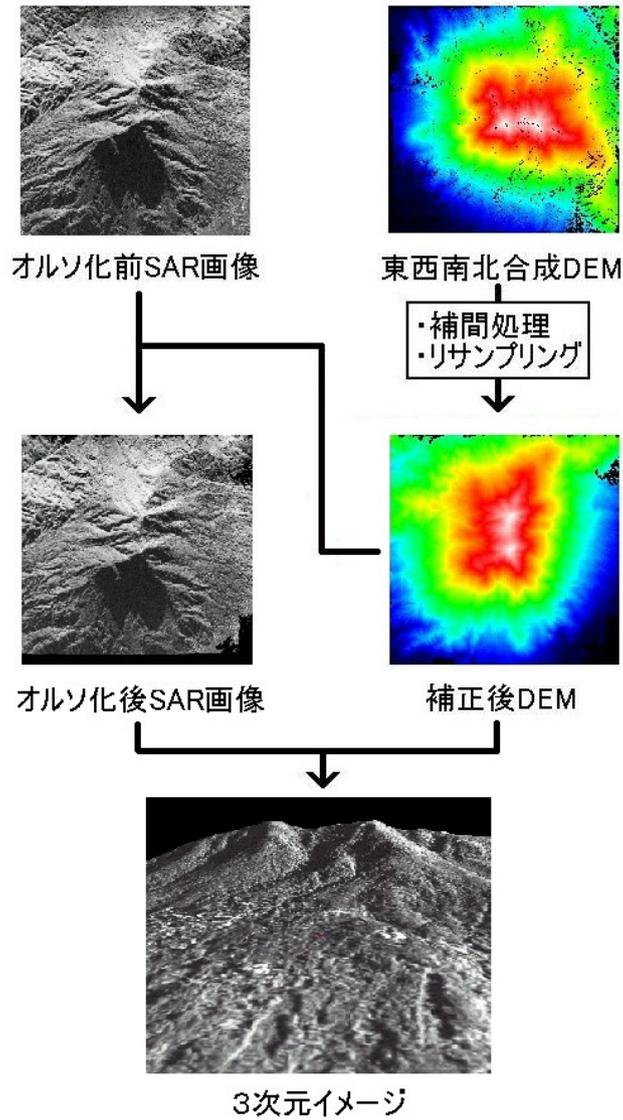


図 2.2.7 オルソ画像・3次元イメージの作成過程（筑波山）

（岡谷ほか, 2001 をカラー化）

オルソ化前後の SAR 画像と補正後 DEM は東が上方で、東西南北合成 DEM は北が上方である。画像の枠の一边は約 5 km である。

2. 3 衛星 SAR による地すべりの解析

干渉 SAR は cm オーダーの微少な地形変化が捉えられるという点で、空中写真や光学センサと比較して決定的に有利である。年間の移動距離が数 cm～数十 cm といった地すべり地の地形変化の把握は、SAR の有力な適用対象である。

干渉 SAR は地表の動きを面的に把握できるため、地すべりの移動範囲と移動量が同時に推定可能である。移動範囲が特定できれば、対策を取るべき地すべり土塊を特定でき、現地での移動杭観測や GPS 観測、集水井の設置や盛土切土といった対策工事などを、どこで重点的に行うべきかを検討するための貴重な情報が得られる。

これらを踏まえて行った干渉 SAR を用いて地すべりを解析した研究について述べる。対象地域は谷地地すべりや狼沢地すべりなどの著名な地すべり地がある秋田県東成瀬地区である。また、地すべり土塊の微地形分類を行う際に航空レーザ測量データを用いることで、能動型センサの組合せによる研究の発展性についても検討する。

2. 3. 1 手法

東成瀬地区は秋田県南東部に位置し、東成瀬村の中央部を南部から北部に向かって北上する形で成瀬川が流れている（図 2.3.1）。谷地地すべりや狼沢地すべりなどに代表される地すべり地は、この成瀬川に沿って存在する。成瀬川には谷底低地はほとんどみられず、河床から 10～40 m の高さの河岸段丘が両岸に発達する。さらに、右岸側ではこれらの段丘面から 40～60 m の高さに高位の段丘が断片的にみられる。また、両岸に数多くの地すべり地形が形成されている。

谷地地すべり、狼沢地すべりともに、対策の進捗等により 2009 年以降はそれ以前と比較して移動量が減少しており、特に谷地地すべりについては移動量が極めて小さくなっている。一方、狼沢地すべりについては、2008～2009 年でも年 10 cm 程度の移動が観測されているところがあり、本研究ではこちらに着目した。

狼沢地すべり地は、斜面の傾斜方向が全体的に北西方向であり、地すべり地形の最上部は、標高約 900 m の北東-南西性の稜線に相当する。稜線付近には滑落崖に相当する急崖は認められない。同地すべり地は、幅約 1.3 km、長さ約 2.3 km の規模を有し、北西に傾斜する斜面の平均傾斜は約 13° である。斜面は凹凸に富み、湿地が点在するとともに、狼沢や豊ヶ沢が斜面を浸食している（森屋ほか, 2005）。狼沢地すべり地及び谷地地すべり地周辺に分布する地層については、森屋ほか（2005）が既存研究（早川ほか, 1954; 武藤, 1965; 臼田ほか, 1981; 北村, 1985）を引用しつつ、東北地方の新第三紀の標準層序における中新世前期～中期の西黒沢層に対比される西小沢層と、中新世中期の女川層に対比される山内層で、硬質な泥岩からなるとしている。狼沢地すべりでは、秋田県雄勝振興局農林部が移動杭観測を実施しており、継続的にその挙動を追跡している。狼沢地すべり周辺の地表面特性については、土地被覆はほぼ森林に

よって占められており、SARによる観測に対して強い反射体となる建物等はほとんど存在しない。

地すべり地を対象とした干渉SARでは、植生などの影響を受けづらくコヒーレンスが高いLバンドが有効である。このため、分解能10 m程度のLバンドセンサのALOS/PALSARを用いた。ALOSは2011年5月に運用を停止したが、後継機ALOS-2などにおいて、得られた研究成果が応用可能と考えたためである。

本研究で実施したSAR干渉画像による地すべり性変動抽出の概要、及び航空レーザ測量データによる微地形分類の概要は以下のとおりである。

1) SAR干渉画像における地すべり変動の抽出

SAR干渉画像は、地すべりに伴う地形変化を抽出できるポテンシャルを持つが、あらゆる条件において有効というわけではない。ALOS/PALSARは、地表を東側又は西側上空から観測し、干渉SARによって把握できる変化量は、原理上衛星に搭載されたセンサと地表との距離の変化となる。しかし、計算処理によって得られる距離は、距離の変化そのものではなく、レーダーの半波長で割った余りの長さである。一方、衛星から地表への視線方向（レンジ方向）とほぼ直行する南北方向の変動にはほとんど感度がない。したがって、ALOS/PALSARによる干渉SARは、地すべりの東西方向、上下方向の移動成分を主に捉えており、南北方向の移動はほとんど分からないことに留意が必要である。また、例えば南行軌道では東側から地物を観測するため、地すべり土塊の西方向への移動と沈降は、いずれも衛星からの距離が増加する方向に働く。よって、西向き斜面の地すべりでは相乗効果で変動がよく検出できることとなる。一方、北行軌道では西側から地物を観測するため、西向き移動は衛星に近づく方向となるのに対し、沈降は遠ざかる方向のため、お互いが打ち消しあって変動が検出しづらい。狼沢地すべりは、各ブロックの移動方向が北西から北北西向きと西向き成分を持っているため、南行軌道において捉えられやすいことが予想される。また、平均傾斜が約 13° であり、レーダーの入射角が 40° 程度であるため、大局的には衛星の影となる部分は少ない。

東成瀬地区の地すべりは積雪地帯に存在するため、積雪・融雪のサイクルに伴い活動する地すべりの可能性が高い。このため、経年的な挙動を適切に捉えるためには、1年程度かそれ以上の間隔を持ったデータ同士で干渉処理を行う必要がある。しかし、干渉させるデータ同士の観測時期の差が大きくなると、土地被覆や土地利用の経年変化の影響を受けやすくなる。このため、例えば観測時期の差が3年を超える場合はあまり適切でないと考えられる。過去の研究事例として、当該地域周辺で干渉SARによる地すべり抽出を試みた清水ほか（2005）があるが、コヒーレンスの確保のために基線長を短くしたため、干渉ペアが制限され、結果として選択した観測時期が1993年10月と1997年3月となった。観測時期の差が3年を超えたことなどから、他地域では地すべりの痕跡を見つけられたが、東成瀬周辺では明瞭な痕跡を得るには至らなかった。しかし、2006年に打ち上げられたALOSでは、重点的な観測により、ほぼ1年間に相当する周期のSAR干渉ペアが得られるケースが増加した。東成瀬地区のケースも例外ではなく複数のSAR干渉画像の作成が可能である。

図 2.3.2 は、ALOS/PALSAR データによる東成瀬地区周辺の SAR 干渉画像である（期間：2006 年 4 月 27 日～2007 年 4 月 30 日）。期間の特徴として、付近にある気象庁アメダス（湯ノ岱：北緯 38 度 57.6 分、東経 140 度 31.7 分、標高 335 m）の観測値（気象庁, 2015a）によると、2006 年は 4 月 21 日ごろまで積雪が残り、2007 年は 4 月 1 日で積雪が解消されていた。山間部では、さらに後まで積雪の影響があったとみられるが、2006 年では湯ノ岱の消雪からの期間が短く、2007 年では期間が長いこと、2006 年のほうが積雪がより多かったと考えられる。このため、前後の観測時の積雪状態の差がコヒーレンスの低下をもたらしたと考える。このほかにも、垂直基線長が 440 m と 2008～2009 年の SAR 干渉ペア（52 m）と比較して長いこともコヒーレンスの低下に寄与しているとみられる。このように今回採用した観測ペアは変動を捉えづらい条件にあるが、それでも図の右上にある狼沢地すべり近辺において、青で示される周囲とは異なる、赤の割合が高い部分が広がっており、傾向が異なっていることが判読可能である。このことは、狼沢地すべり付近で局地的変動があった可能性を示している。

2) 航空レーザ測量データによる微地形分類

SAR 干渉画像に示される局地的変動を、地すべり土塊の移動と関連付けるためには、土塊の分布の正確な把握が不可欠である。微地形分類は、空中写真などを用いる方法が主だが、大都市、主要河川流域、海岸部等を中心として近年多くの測量が行われている航空レーザの活用が有効である。例えば 1:5,000 程度の縮尺の等高線図であれば、現地で地すべり地形を把握するのに最適であり、写真測量よりも航空レーザ測量による等高線図のほうが、地すべり地形を読図しやすいことが八木ほか（2003）などによって示されている。これを踏まえ本研究では、航空レーザ測量データを用いて微地形分類を行った。図 2.3.3 に、航空レーザ測量データによる狼沢地すべり周辺の微地形分類図を示す。航空レーザ測量の観測諸元は表 2.3.1 のとおりであり、スキャン密度は 1.0×1.0 m メッシュに 1 点以上レーザが照射される形で、2010 年 10 月 22 日～23 日に計測を行った。

航空レーザ測量を実施した範囲には、5 つの大きなブロックがあることが確認された。このうち、秋田県雄勝振興局農林部により移動杭観測が行われている狼沢と豊ヶ沢の間の範囲に位置するものは、L1～L4 の 4 つである。各ブロックの大きさは幅 200～500 m、長さは 1 km 程度に及び、その標高は 400～900 m 程度である。4 つのブロックは微地形分類によりさらに 2～5 個のサブブロックに分割され、その内部もさらに複数に分割される。L1 の南側を構成するサブブロックと L2 の北側を構成するサブブロックは先の森屋ほか（2005）における「狼沢地すべり地 I ブロック」にほぼ相当し、狼沢地すべりの活動域の主要部分を形成すると考える。最も細分化されたサブブロックは、幅 100～200 m、長さ 100 m～1 km 程度の移動体となっている。

2. 3. 2 結果

東成瀬地区について得た ALOS/PALSAR の SAR 干渉画像は、2006 年 4 月～2007 年 4 月と 2008 年 7 月～2009 年 6 月の 2 組であり、それらを図 2.3.4 と図 2.3.5 に示す。SAR 干渉画像において確認された変動は以下のとおりである。

1) 2006 年 4 月 27 日～2007 年 4 月 30 日の SAR 干渉画像の判読結果

図 2.3.2 の画像について狼沢周辺を拡大したものを図 2.3.4 に示す。観測諸元は、図 2.3.4 のとおりである。赤色の発色域を楕円で図示したほか、図 2.3.5 との比較のため図 2.3.5 で確認される変動域などにあたる楕円も図示した。図 2.3.4 は全体的に干渉縞が明瞭でなく、コヒーレンスが低い。それでも図中央付近にあるサブブロック L3-2 を中心とした青破線の楕円の内部では、周囲と異なる赤色の発色がみられる。分かりやすくするため、赤色の発色が見られる左の青破線の楕円について、白破線の四角部分を抜き出したものを図 2.3.4 右下に表示した。これは局地的な変動があった可能性を示している。一方、その東側は赤・黄・青などが混ざった斑模様となっており、これだけでは実際に局地的な変動があったかどうかは分からない。

2) 2008 年 7 月 6 日～2009 年 6 月 3 日の SAR 干渉画像の判読結果

観測諸元は図 2.3.5 のとおりである。期間の始めと終わりはいずれも積雪はないとみられ、垂直基線長も短いため、コヒーレンスの低下をもたらす要因は少なく、図 2.3.4 と比較すると干渉縞が明瞭である。図 2.3.5 では、東側の青破線楕円の範囲について北西から南東に向かって、黄緑→紫→赤→黄という色の変化が見られる。これは衛星と地物との距離変化で言えば 9 cm 程度の延長に相当する。一方、図 2.3.4 で周囲と異なる赤色の発色を確認した西側の青破線楕円の範囲については、図 2.3.5 では周囲との差異は見られない。このため、2008～2009 年の移動範囲はサブブロック L1-4 から L2-2 にかけての範囲に限定されると判読される。

2. 3. 3 検証及び考察

図 2.3.4 における周囲と異なる赤色の発色や、図 2.3.5 における黄緑→紫→赤→黄の色変化を伴う干渉縞は、局地的な変動の存在の可能性を示している。これを踏まえ、航空レーザ測量データによる微地形分類結果と SAR 干渉画像、秋田県雄勝振興局農林部の移動杭観測データとの対比により、活動的地すべりブロックの推定など、SAR 干渉画像による地すべり性変動の抽出可能性について検証を行った。

まず、図 2.3.4 及び図 2.3.5 に該当する秋田県雄勝振興局農林部の移動杭観測データの水平成分ベクトルを、それぞれ図 2.3.6 (2006.11-2007.11)、図 2.3.7 (2008.11-2009.11) に示す。移動杭は秋田県雄勝振興局農林部により、狼沢のブロック L3 より上方 (東方) を中心として 60 点近く設置されている。測量は狼沢地すべりの外部から単点放射法によりトータルステーションを用いて行ったものであり、当該の外部点を不動としたため、得られた成果ベクトルは絶対値ではなく相対値である。測量距離は数百 m～2 km ほどであるため、測距精度は 1 cm 以下と想定されるが、測角精度は 5 秒又は 10 秒で距離に直すと数 cm である。このため、移動杭の観測値同士が 2～3 cm 程度違っていてもその差は有意ではなく、相対的に異なる動きをしていた

とまでは言い切れない。ただし、観測値に 10 cm 以上の違いがあれば移動杭同士が相対的に異なる動きをしていたことが推定可能である。

当該地域は積雪地帯であるため、融雪が地すべりの主因とみられ、移動は主に融雪期（2～5月ごろ）に発生すると考えられる。図 2.3.4 と図 2.3.6 は、それぞれ 2006 年 4 月～2007 年 4 月、2006 年 11 月～2007 年 11 月と観測期間は異なるが、図 2.3.6 の移動杭の観測値に影響を与えた時期が 2007 年 2～5 月頃と考えれば、図 2.3.4 の観測期間はその大半を含むため、図 2.3.4 に示す SAR 干渉画像で見られる変化は、ほぼ図 2.3.6 に示す移動杭の移動量と対応する。これらを踏まえ、2006～2007 年と 2008～2009 年のそれぞれについて、SAR 干渉画像と地すべりとの関係について検証を行う。

1) 2006～2007 年に発生した地すべりと SAR 干渉画像との対応

SAR 干渉画像、微地形分類、現地観測データに相当する図 2.3.4 と図 2.3.6 を対比する。図 2.3.4 の西側の青破線楕円の周囲と異なる赤色の発色が、何らかの変動があった可能性を示したのに対し、対応する図 2.3.6 のサブブロック L3-2 周辺の移動杭の移動ベクトルはほぼ北西方向でかつ水平移動量が 10 cm 程度と揃っている。このため、サブブロック全体が同じような動きをしていたことが分かる。全体的にざらついた画像ではあるが、サブブロック L3-2 付近で周辺と異なる赤色の発色が認められたことは、単にそこで変動があったことを示すだけでなく、サブブロック全体が比較的均一な動きをしていたことを反映していると考えられる。

一方、図 2.3.6 の移動杭観測のデータは、サブブロック L3-2 よりも、東側にあるサブブロック L2-2、L1-4 などが、移動量が大きいことを示している。この範囲は図 2.3.4 では赤・黄・青などの斑模様となっており、局地的な変動が断定できない場所に相当する。移動量が最大となっているサブブロック L1-4 の内部の水平移動量を見ると、20～40 cm とばらつきが大きく、サブブロック内部が不均質な動きをしていることが分かる。このため、SAR 干渉画像上では赤・黄・青などが混ざった領域となり、干渉縞が明瞭に確認できないコヒーレンスの低い画像の中では、地すべり地外にある「無変動」領域が、サブブロック L1-4 や L2-2 などの「無変動ではない」領域と同じような見え方となっている。このため、サブブロック L1-4 や L2-2 などの変動が埋もれてしまったと判断される。

これらのことから、変動があっても地すべりブロック内部の移動量が不均質な場合は、図 2.3.4 のようにざらつきが大きくなり、SAR 干渉画像では視認しにくいことが分かった。また、それにも関わらず周囲と異なる発色が確認できる場合は、局地的な変動の存在を把握できるだけでなく、地すべりブロックの均質な動きについても言及できる可能性があることが示された。

2) 2008～2009 年に発生した地すべりと SAR 干渉画像との対応

SAR 干渉画像、微地形分類、現地観測データに相当する、図 2.3.5 と図 2.3.7 を対比する。図 2.3.5 の SAR 干渉画像において、色調から想定される最大変動域はサブブロック L1-4 に相当するが、ここは 2006～2007 年の観測値でも移動量が最大となっている。また、図 2.3.7 の移動杭との比較により、10 cm 近くにわたる水平変動は L2-1 から L1-4 の南西部にかけて見ら

れ、そこから L2-2、L2-3 と北西に向かうにしたがって、値が小さくなっていることが分かる。移動ベクトルは 2006～2007 年の L3-2 ほどは揃っていないが、大体西北西～北西に向かっている。また、L1-4 の南西部から L2-3 に向けて徐々に変動量が減少していく傾向が見られるが、このことが図 2.3.5 の干渉縞（黄緑→紫→赤→黄）に対応していることが分かる。さらに、2006～2007 年では移動杭の観測値で変動が見られたサブブロック L3-2 にはほぼ変動は見られず、少なくともこのシーズンにおいては L3-2 以西のサブブロックについてはほぼ静止していたと判断される。

これらのことから、図 2.3.5 のように画像の干渉縞が明瞭に確認されるケースでは、変動を明瞭に確認することが可能であり、連続するサブブロック間の移動量の変化の様子が干渉縞と良く対応することが分かる。また、2006～2007 年に活動的であったサブブロックの静止が確認されるなど、地すべりの盛衰にも言及できることが示された。

以上のように、SAR 干渉画像は単純に地すべり性変動の有無だけでなく、地すべりの盛衰、活動的なブロックの変化、ブロック内の変動のばらつきなど、様々な地形変化を適切に反映していることが分かった。SAR 干渉画像において斑模様が見られる場合、気象条件や地表状態などの不均質性によるコヒーレンス低下の可能性も否定できないため、全てが無変動領域と対応するとは断定できない。しかしながら、移動杭観測データなどのグラントゥールースデータが適切に得られれば、地すべりの挙動の面的な把握が可能なことを示したと考える。また、SAR 干渉画像に見られる色変化と、地すべりブロックとの対応付けが良好であったことは、航空レーザ測量データを用いることで微地形分類が高度化し、地すべりのメカニズム解明に貢献することを改めて示したと考える。

2. 3. 4 まとめ

干渉 SAR を用いた地形の解析の研究を発展させるため、地すべりを対象とした研究を実施した。あわせて、地すべり土塊を判別するための微地形分類を行う資料として航空レーザ測量データを用いることで、能動型センサの組合せによる研究の発展性についても検討した。

SAR 干渉画像から、地すべりに伴う地形変化をどの程度把握できるかについて、秋田県東成瀬村にある狼沢地すべりを対象として解析した結果、SAR 干渉画像は時期ごとに異なる活動的な土塊を的確に捉えていることが分かった。また、2006～2007 年では活動的だった狼沢地すべりの下部ブロックが、2008～2009 年では移動杭の観測データで示すように活動が沈静化しているなど、土塊の活動の消長の把握にも役立つことが分かった。現地では地すべりに対する対策工事が行われているが、その効果や課題を面体に把握する上で、SAR 干渉画像は適切な情報を与えられることが示された。また、航空レーザ測量データによる微地形分類が、活動的なブロックの特定につながることが分かった。

このように、本研究は能動型センサの組合せにより、地すべり地における地形変化について地すべりブロックを把握可能なところまで研究を進展できることを示した。また、SAR 干渉画

像の干渉縞、地すべりの移動方向、傾斜などを対応付けることにより、他の地すべり地でも地すべりに伴う地形変化量を推定可能である（国土地理院, 2011a）。本研究の成果は、従来は地震の研究等で行われてきた地形変化の面的把握から一歩進んで、個々の地すべりブロックと地形変化量を結び付けたものであり、地すべりのメカニズムの解明等につながると考える。干渉 SAR を用いた地すべり把握については、月山周辺を対象とした佐藤ほか（2012）においても、その有用性が示され、国土地理院でも SAR 干渉画像を用いた地すべりの活動状況把握が実務的な定常解析対象となった（国土地理院, 2016a）。

適切な干渉ペアの抽出は、観測期間、観測時期、軌道間距離など観測間の相対的な条件に加え、気象条件など観測ごとの条件に左右されるため、ALOS/PALSAR では数が限られるという問題があった。例えば、図 2.3.4 では前観測日（2006 年 4 月 27 日）、後観測日（2007 年 4 月 30 日）ともに積雪が残っている時期であり、積雪状態に違いがあるため地表状態の差異による反射波の類似性の喪失、すなわちコヒーレンスの低下が発生した。しかし、もしも図 2.3.5 のように双方の観測時期で積雪がないデータであったならば、このような影響はなく、干渉縞が明瞭な画像が得られたことが期待され、サブブロック L1-4 や L2-2 の変動も「無変動ではない領域」として抽出できたはずである。本研究で用いた ALOS の運用は 2011 年に停止したが、2014 年に ALOS-2 が新たに運用開始し、分解能が向上するとともに回帰日数も ALOS の 46 日と比較して 14 日に短縮された（宇宙航空研究開発機構, 2014）。このため、上記のような問題も観測機会の増加により改善すると考えられ、地すべりに関する地形の解析も今後高精度化していくものと考ええる。

(2.3 図表集)



図 2.3.1 狼沢地すべりの位置と地形 (岡谷ほか, 2012)

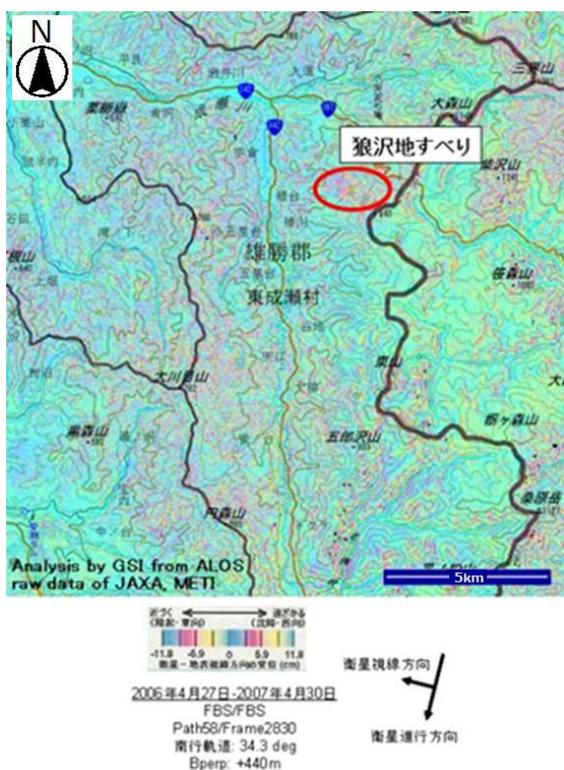


図 2.3.2 秋田県東成瀬地区周辺の SAR 干渉画像
(岡谷ほか, 2012 について、方位・縮尺の明瞭化を実施)

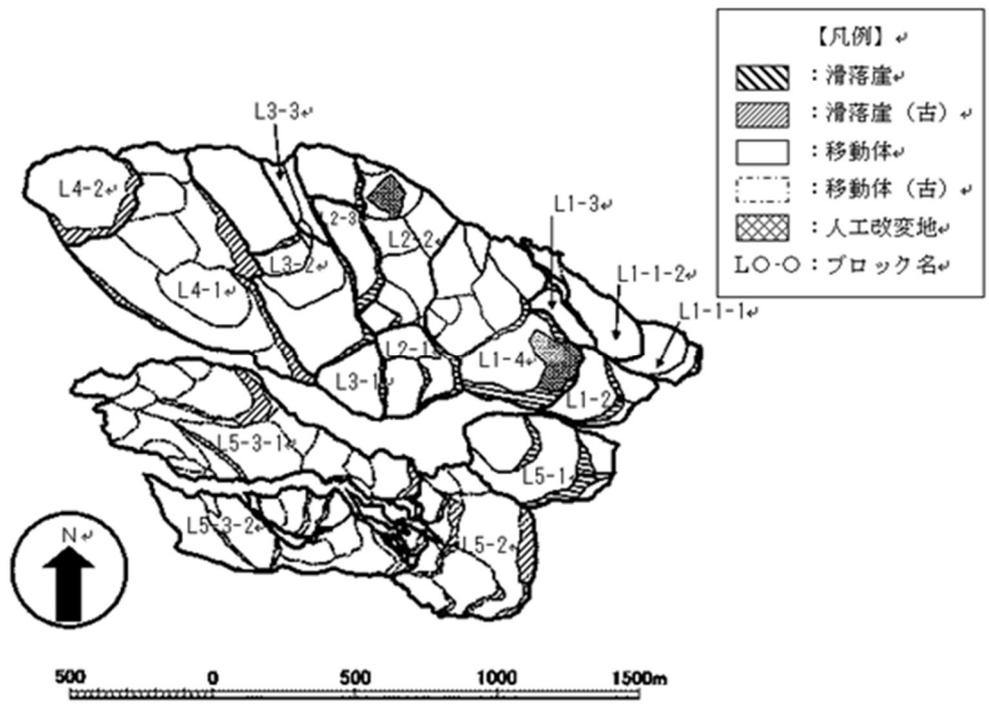


図 2.3.3 狼沢地すべりの地形分類図 (岡谷ほか, 2012)

表 2.3.1 航空レーザ観測諸元 (岡谷ほか, 2012)

機材		SAKURA
搭載航空機	回転翼	AS350B(JA9411)
レーザパルス発射数	Hz	50,000
スキャン角	±°	30
ビーム広がり角	mrad	0.5
対地飛行速度	km/H	100
対地飛行高度	M	600
計測幅(基準面)	M	690
計測点間隔(進行方向)	M	0.74
〃 (直交方向)	M	0.71
サイドラップ	%	50

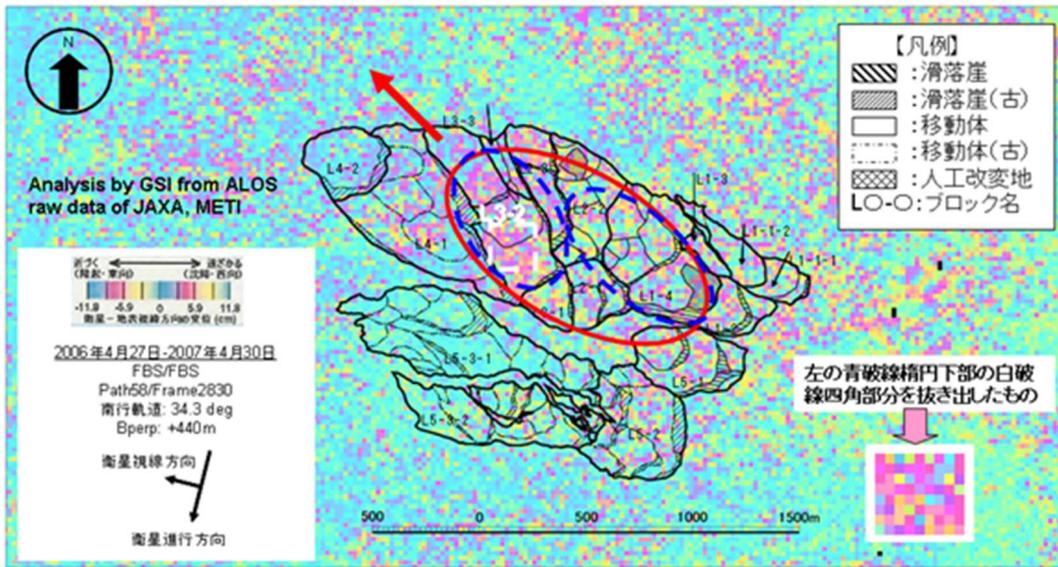


図 2.3.4 狼沢地すべり周辺の SAR 干渉画像と地形分類図の重ね合わせ (2006-2007)
(岡谷ほか, 2012)

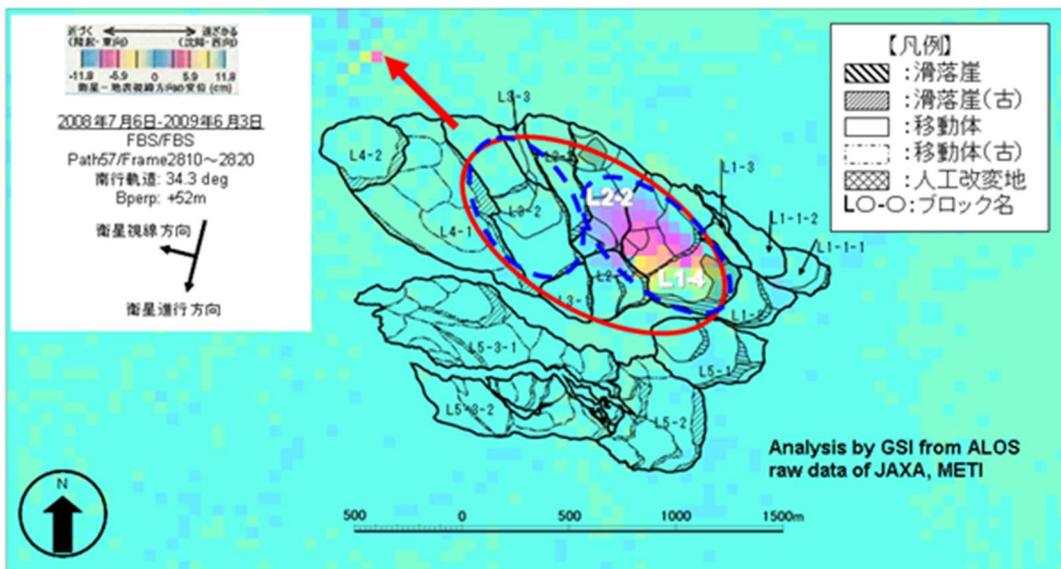


図 2.3.5 狼沢地すべり周辺の SAR 干渉画像と地形分類図の重ね合わせ (2008-2009)
(岡谷ほか, 2012)

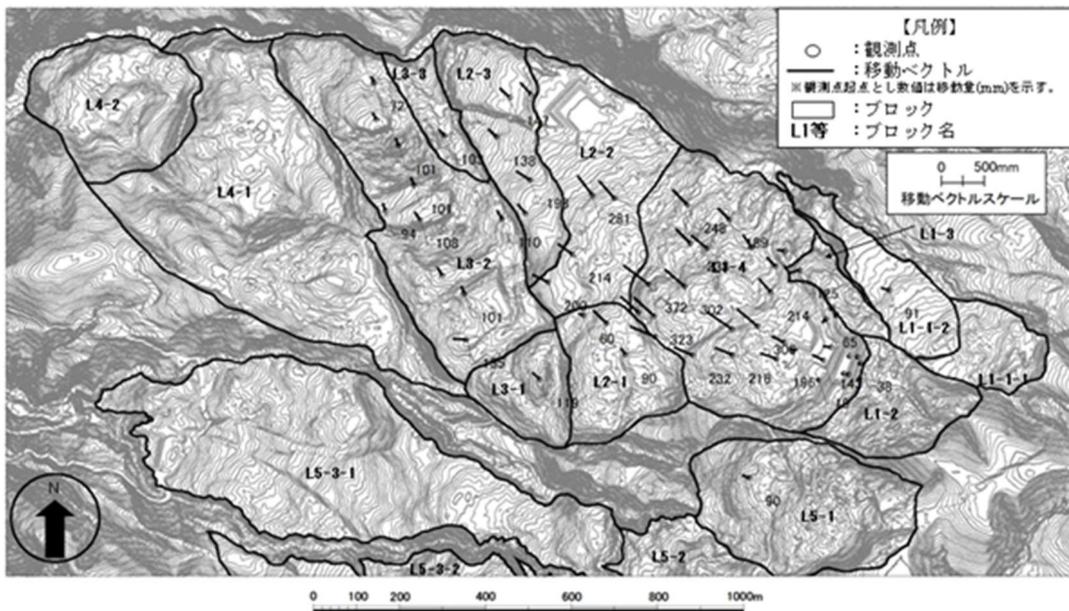


図 2.3.6 狼沢地すべり周辺の移動杭のベクトルデータ (2006-2007) (岡谷ほか, 2012)

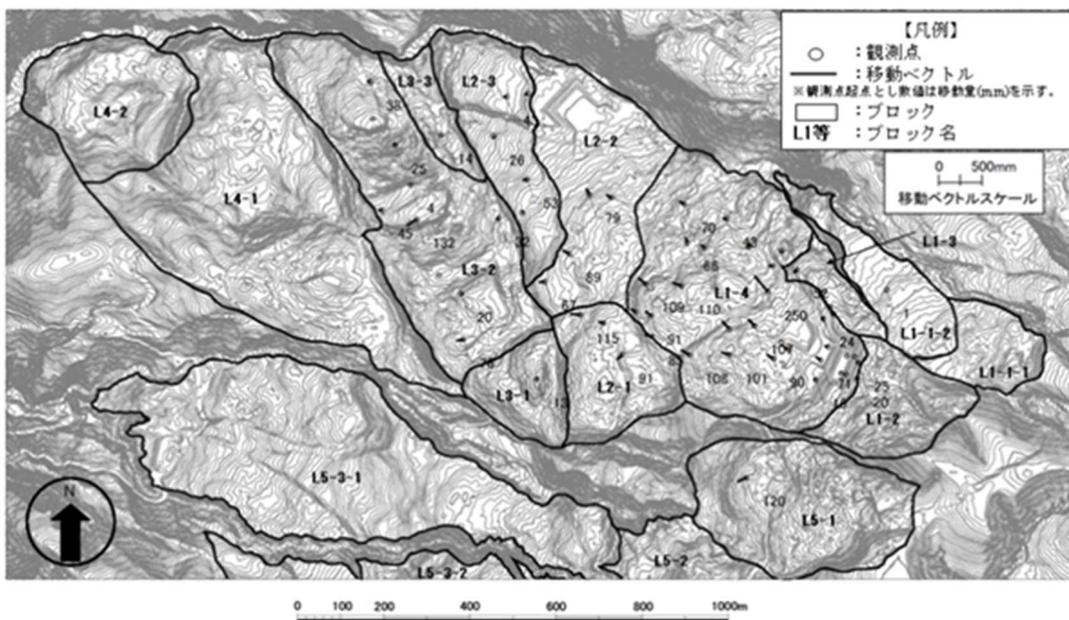


図 2.3.7 狼沢地すべり周辺の移動杭のベクトルデータ (2008-2009) (岡谷ほか, 2012)

3. レーザを用いた地形の把握と解析

航空レーザや地上レーザで用いられているレーザ測量（あるいはレーザ計測）とは、レーザ光を地表や目標地物に向かって放射し、その反射波を計測し、データを処理することで反射点の3次元座標が得られるものである。航空レーザは、センサと地表との距離が相対的に大きいため、レーザの照射密度が1 m²あたり数点にとどまる。これに対し、地上レーザは地上からの観測となるため目標地物との距離が短く、照射密度は数 cm 四方に1点など高くなる。これを踏まえて、本章ではレーザによる自然災害を対象とした地形の把握などに関する研究として、以下の3つの研究成果を示す。

- 1) 地上レーザによる地表地震断層の把握
- 2) MMS による津波被害の把握
- 3) 航空レーザによる森林の形状と斜面安定性の解析

1) と 2) の研究は、それぞれ据え置き型地上レーザと、移動型地上レーザの代表的技術として MMS を用いた研究事例を示す。地物の3次元位置を取得する手法である MMS には大きく分けて2つのタイプがある。1つはレーザ機器を用いたもの（例えば、アジア航測株式会社, 2012）であり、もう1つはビデオカメラ画像を用いたもの（例えば、株式会社トプコン, 2009）である。原理的にはどちらも地物の認定から3次元位置の計測に進む。そこで本研究では、地上レーザを用いた研究の類似事例として、ビデオカメラ画像タイプの MMS を用いた成果を示す。1) の研究では、地震に伴い地表に出現した地震断層が、地上レーザからどのように把握可能かを検討する。地表地震断層の把握を詳細に行うために、数百 m 四方の規模について 10 cm の段差の認定ができる精度で計測されたデータを活用する。2) の研究では、地震に伴う津波被害が広域にどのように現れ、計測された津波の浸水深が建物流失等の被害とどのように対応するかを検討する。距離数百 km の範囲について、10 cm 以下の分解能で計測されたデータを活用する。3) の研究では、航空レーザ測量から得られる DEM (DTM) や DSM から、樹木の高さなどの3次元形状に関する情報を把握する。また、航空レーザ測量データから得られた地形情報や樹木の3次元形状に関する情報について、斜面災害に対する脆弱性の把握可能性を検討する。この際には、豪雨による斜面崩壊が顕著な数 km 四方を対象とし、2 m メッシュの DEM (DTM) をベースに 30 m 四方のメッシュごとに樹高などの指標を得る。

3. 1 地上レーザによる地表地震断層の把握

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（別名「東日本大震災」、M9.0）のちょうど1ヵ月後の4月11日、福島県浜通りを震源とするM7.0の地震（以下、「本地震」と記す。）が発生した。本地震は、上記M9.0の地震の余震のように扱われているが、陸のプレート内の浅い場所で発生した正断層型の地震であり、メカニズムは全く異なっている。また、本地震は道路上の段差等として地表地震断層がいわき市内陸部の複数個所に現れており、これらは既知の井戸沢断層及び湯ノ岳断層とその延長部及びその周辺に集中している。なかでも、井戸沢断層上にあたる、いわき市田人町黒田の塩ノ平から斉道にかけての1帯では、集落に向かう道路上に2 m 近くの段差が見られ、集落上の家屋内に地表地震断層によるとみられる段差が生じており、本地震に伴う断層変位が最も顕著に観察されている。

しかし、現地で見られる段差については、段差が2つに分離したり、そのうちの一方が水田中で消滅したりするなど形状は複雑である。このため、地表地震断層の全容の解明には、通常1 m²あたり計測密度が数点にとどまる航空レーザ測量では不十分である。これに対し、過去の研究事例は金田（2008）などがみられる程度と少ないが、地上レーザは詳細な地物形状の把握が可能のため、地表地震断層の把握に適していると考えられる。これを踏まえ、地上レーザを用いた研究の応用を発展させるため、地表地震断層の把握を対象として本研究を実施する。

3. 1. 1 手法

本地震では、いわき市内陸部の複数個所に地震に伴うとみられる地表地震断層が東京大学地震研究所（2011）、土木研究所（2011）等の報告により確認されている。筆者らは、これを調査するため、地震後の4月21日～22日にかけて現地調査を実施した。その対象地区の概要図を図3.1.1に示す。図の背景地図は電子国土Webを使用したものであり、図中の活断層の概略位置は中田・今泉（2002）に基づく。

本研究の中心となる田人町黒田塩ノ平及びその周辺は、井戸沢断層を構成する西側の断層線上にあたる。道路上における約1.8 m の段差など、本地震で見られた地表地震断層の最大の変位が見られることが、東京大学地震研究所（2011）等の調査から明らかとなっている。ここでは、2 m 近くの段差が道路に見られた場所の周辺を塩ノ平地区、その北側にある水田地帯を塩ノ平北方地区と便宜上呼ぶこととした。

塩ノ平及び塩ノ平北方地区の地表地震断層の分布の面的把握には、GLS-1500（TOPCON社製）を用いた。機械点、後視点をGNSS測量など（今回はVRS-RTK測量）により設置することで、基準点がない場所でも、計測点の位置を座標として求められる。測距方式は、クラス1のレーザによるパルス方式（Time of flight）であり、測定距離は反射強度が18%の場合でも150 m まで計測が可能である。このとき、距離精度は4 mm、角度精度は6" である。レーザの反射位置の座標の測定だけでなく、レーザと同軸に組み込まれたデジタルカメラによる撮影も可能である。計測密度を上げすぎるとデータ量が膨大となるため、計測密度は50 m 先

で 2 cm とした。この設定で、図 3.1.2 のように塩ノ平地区及び塩ノ平北方地区で、それぞれ 2 箇所から地上レーザ計測を実施した。計測時間については、設置点毎にスキャナーによる計測に 1 時間程度を要しており、これに加えて選点や GNSS による位置決定等の作業時間を要した。

塩ノ平北方地区において実施した、地上レーザによる計測手法は以下のとおりである。まず、2 箇所の地上レーザ設置箇所（機械点）の中間付近に後視点を設置し、一方の機械点と後視点の座標を VRS 法により求めた。次に、求めた 2 つの座標値からもう一方の機械点の座標をトータルステーションの後方交会法で求めた。2 つの機械点及び後視点が測地座標を持つため、機械点と後視点の位置を基準として地上レーザ計測を行えば全ての点群が測地座標を持つことになる。また、GLS-1500 は 6' のチルトセンサが付いており、100 m 先でも 3 mm の精度で測定が行え、GNSS による機械点等の位置決定精度をほとんど劣化させないと考えられる。このため、2 箇所から計測したデータを単純に重ね合わせることで、本研究の点群データとした。塩ノ平地区では、双方の機械点の座標決定を VRS 法により求めた点が異なるが、同様の手法により地上レーザによる計測を実施し、範囲内にある道路の段差等で矛盾がないことを確認した。

図 3.1.3 はレーザの反射位置の座標点群データに、デジタルカメラによる画像を組み合わせた例である。本研究で用いた GLS-1500 では、カメラ及びレーザは筐体内の同軸のそれぞれ上下に配置されており、1 台毎にカメラキャリブレーションを行い写真の標定を実施している。機械点から見た写真と点群は重ね合わせが可能のため、色情報（RGB）を点群に付加した。厳密に言えば、地上レーザ計測時と写真撮影時に時間差が生じるが、調査地は交通量などが極めて少なく時間変化が少ないため、影響はないものとして扱うこととした。図 3.1.3 からは、塩ノ平北方地区南部で地震に伴い発生した水田の水没（図 3.1.3 中央下部の点群がまとめて抜けている場所）や、画像中央に上下 2 段に分かれる地表地震断層などの存在と点群分布が明確に対応していることが分かる。

3. 1. 2 結果及び考察

塩ノ平及び塩ノ平北方地区に見られる地表地震断層は、図 3.1.4 及び図 3.1.5 の各写真（撮影場所と撮影方向は図 3.1.2 に示したとおり）に見られるように、道路に生じた段差、川をせき止めた淵、水田の水没や段差の発生などが象徴的である。各地区の地上レーザによる計測の成果及びそれに対する考察は以下のとおりである。

1) 田人町黒田塩ノ平地区

塩ノ平地区では、段差を生じた道路及びその南方の川や対岸の崖等の地形を明瞭化するために、図 3.1.2 の左下図の範囲について地上レーザによる計測を行った。その結果を図 3.1.6 に示す（以下本文中の丸数字は図 3.1.6 の左側にある各横断面図に対応した丸数字を示す）。図 3.1.6 のグラフは、図 3.1.2 の左下図の横断面図作成側線（10 m 間隔）に沿って取得した断面図である。断面図がないところ（①）は川であり、水面のため反射データが得られず欠損とな

っている。段差が出来た道路 (②; 図 3.1.4 左図) は、上から 3 番目の断面にほぼ相当する。断面図を見ると、道路の北側 (③) 及び川の南側 (④) で、いずれも 2 m 程度の段差を確認することができ、道路付近で見られた段差が南側にもほぼ同じ変位量で延びている様子が確認できた。道路の直ぐ南側 (⑤や⑥; 中央付近の断面) は図 3.1.4 右図 (北側からの撮影のため断面とは左右逆) に対応し、右側 (西側) に淵、左側 (東側) に瀬ができていますが、淵の部分も植生が覆い茂り、完全な水面ではないため、平坦な面としては取得できていない。しかし、東側の相対的に高くなった部分 (⑤や⑥の断面の破線の右側) は平坦面が比較的良好に取得されており、断層の位置は図の太破線の位置とおおよそ推察可能である。

地上レーザによる計測の結果から、道路の南側と川の北側の間 (⑤や⑥) で途中不明瞭な部分はあるが、川の南側 (④) にも道路付近 (②) やその北側 (③) と同様の変位が継続しており、断層が 2 m 程度の西落ちという性質を継続しつつ南につながっていることが、明らかとなった。

2) 田人町黒田塩ノ平北方地区

塩ノ平北方地区では、水田に分岐する形でみられた地表地震断層の継続性を地上レーザによる計測で追跡した。その結果を図 3.1.7 に示す (以下本文中の丸数字は図 3.1.7 の右側にある各横断面図に対応した丸数字を示す)。

図 3.1.7 のグラフは、図 3.1.2 の右図の横断面図作成側線 (10 m 間隔) に沿って取得した断面図である。現地でも確認されるとおり、範囲の南端付近 (①; 図 3.1.5 左図) で断層は東西 2 つに別れている。西側の断層線は水中を通るため不明瞭だが、東側の断層線は東側が地上に現れるため位置は明瞭である。変位量は、地区南部において、東側の断層線は下から 5 つ目の断面付近 (②) で 1 m 程度の段差、西側の断層線は下から 8 つ目の断面付近 (③) で 1 m 程度の段差を持つため、累積では塩ノ平地区とほぼ同じ 2 m 程度となる。それより北になると西側の断層線について、道路と交差するあたり (④) までは 1 m 程度の段差がほぼ保存されているのに対し、道路の北側になると徐々に変位が縮小 (⑤, ⑥) し、東側の断層線が水田に再び現れるところ (⑦) でほぼ消滅することが分かる。また、10~20 cm 程度と微小だが、東側の断層線と再び結合するところ (⑦) まで撓曲的な構造を見出すことも可能である。さらに、段差が現れたさらに西側 (⑧から⑨) にかけての断面で地表地震断層が現れている破線の部分の左側) について、目立った撓曲等が現れていないことも分かる。一方、東側の断層線については、南部 (②) で 1 m 程度の段差があり、水田東側の家屋を通過して再び水田に戻ることが確認され、水田に戻った段階 (⑧) で 1 m 程度の段差があることが分かった。この段差は計測範囲の北端 (⑨) でも 70 cm 程度であり、塩ノ平地区や当該地区の南部で確認された 2 m 近い累積変位のうち 1 m は北部でも確認されることが分かる。

しかし、国土地理院で実施した干渉 SAR の結果 (国土地理院, 2011b) からは、塩ノ平北方付近で不連続的に変位量が減少する傾向が見られないため、塩ノ平北方地区の北部でも 2 m の累積変位は存在するはずであり、本計測の結果は残る 1 m の変位もどこかにあることを示唆している。地上レーザによる計測時は確認を行わなかったが、これを踏まえ後に実施した現地調

査では水田家屋の東側（⑤の断面の右側）についても確認を行った。その結果、家屋付近から分岐する形で北北東に延びる段差（図 3.1.5 右図）が確認され、干渉 SAR の結果が示した別の変位が確かに存在することが検証された。

3. 1. 3 まとめ

地表地震断層を対象とした地上レーザによる地形計測の結果から、調査範囲における変位の継続性の確認や、調査範囲外の変位量の推定が可能なが分かった。SAR 干渉画像などで存在可能性が示された地表地震断層について、地形を詳細かつ面的に捉えられる地上レーザにより、航空レーザでは精度上困難なレベルまで追跡が可能であることのメリットは大きい。また、地上レーザでは、断層が分岐した際に各分岐断層への変位量の配分がより正確に得られるため、地震活動の実態把握につながる情報が得られることが分かった。

地上レーザによる計測データが存在しなければ、空中写真や高分解能衛星画像を用いることも考えられる。しかし、これらの画像のステレオマッチングによる DEM は高さ精度に劣り、小規模な撓みなどは抽出困難なため、地表変位を把握できる範囲は限定的と考える。地上レーザでは死角となる部分も含めた広範囲にわたる地表変位の状況の把握では、航空レーザが地上レーザよりも優位である。例えば、高ほか（2011）は「田人町黒田塩ノ平北方地区」の節の末尾で示した、家屋付近から分岐し北北東に延びる段差の計測結果を示している。しかし、位置計測精度や点群データの取得密度の点で、地上レーザがより優位である。例えば、地上レーザによる計測結果では、塩ノ平北方地区で水田上に現れた地表地震断層（図 3.1.7 で①の断面から左側（西側）に分岐するもの）が、計測範囲の北方（図 3.1.7 の⑦）で 10 cm 程度にまで段差が縮小し、その北方には連続しないという解釈が可能である。しかし航空レーザでは、計測精度から段差が縮小する過程で地表地震断層の検出が困難となるため、地表地震断層の延長範囲は地上レーザほどは正確に把握できない。

このように本研究では、地上レーザにより極めて詳細な地形変化を把握できることを示し、地震活動に伴う破壊活動の解明等につながると考える。一方、地上での簡易的な 3 次元写真計測により同様の検討を行う方法も提案されており（斎藤ほか, 2011）、コストの面で地上レーザが最善とは限らない。しかし、地上レーザは現地における写真撮影に基づく方法よりも広域を同時に把握できるメリットがあり、地表地震断層などの把握に有力と考える。

(3.1 図表集)



図 3.1.1 調査地区の概要図

(岡谷・小荒井, 2011a について、方位・縮尺の明瞭化を実施)



図 3.1.3 レーザスキャナーによる3次元イメージ (塩ノ平北方地区南部)

(岡谷・小荒井, 2011a をカラー化)

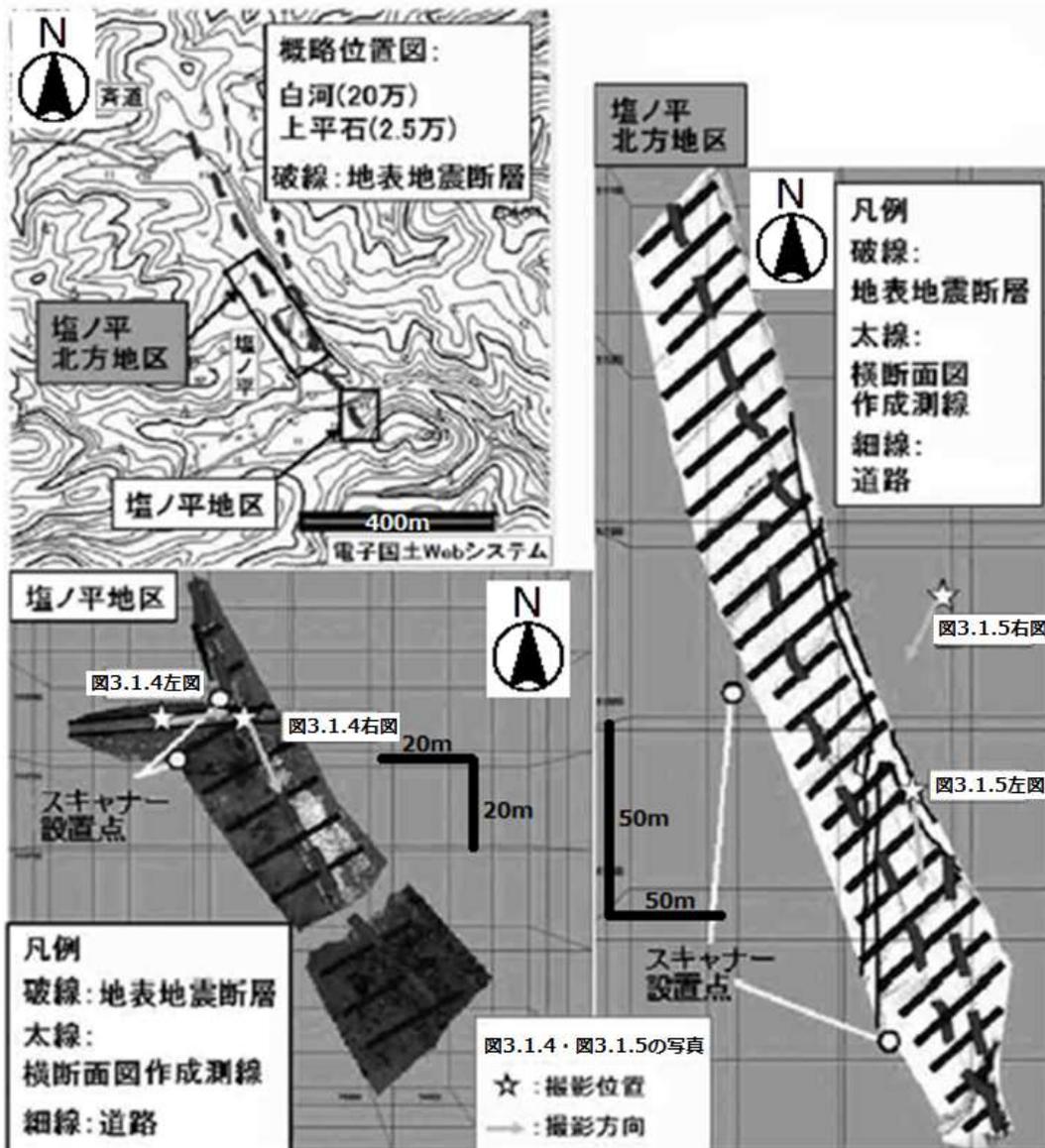


図 3.1.2 レーザスキャナー計測範囲(左上)、各地区の地表地震断層、横断面図を作成した側線、及び図 3.1.4・図 3.1.5 の写真の撮影位置と撮影方向

(岡谷・小荒井, 2011a について、方位・縮尺の明瞭化を実施)

各地区の図は 3D 表示のため東西・南北方向の縮尺は一定でない。数値はおおよその目安。



図 3.1.4 塩ノ平地区でみられた地表変状（岡谷・小荒井, 2011a をカラー化）
 左図は道路に生じた段差を示し、右図は川がせき止められ淵状になっていることを示す。



図 3.1.5 塩ノ平北方地区でみられた地表変状（岡谷・小荒井, 2011a）
 左図は水田の水没や段差の発生を示し、右図は 家屋東側の段差の発生を示す。

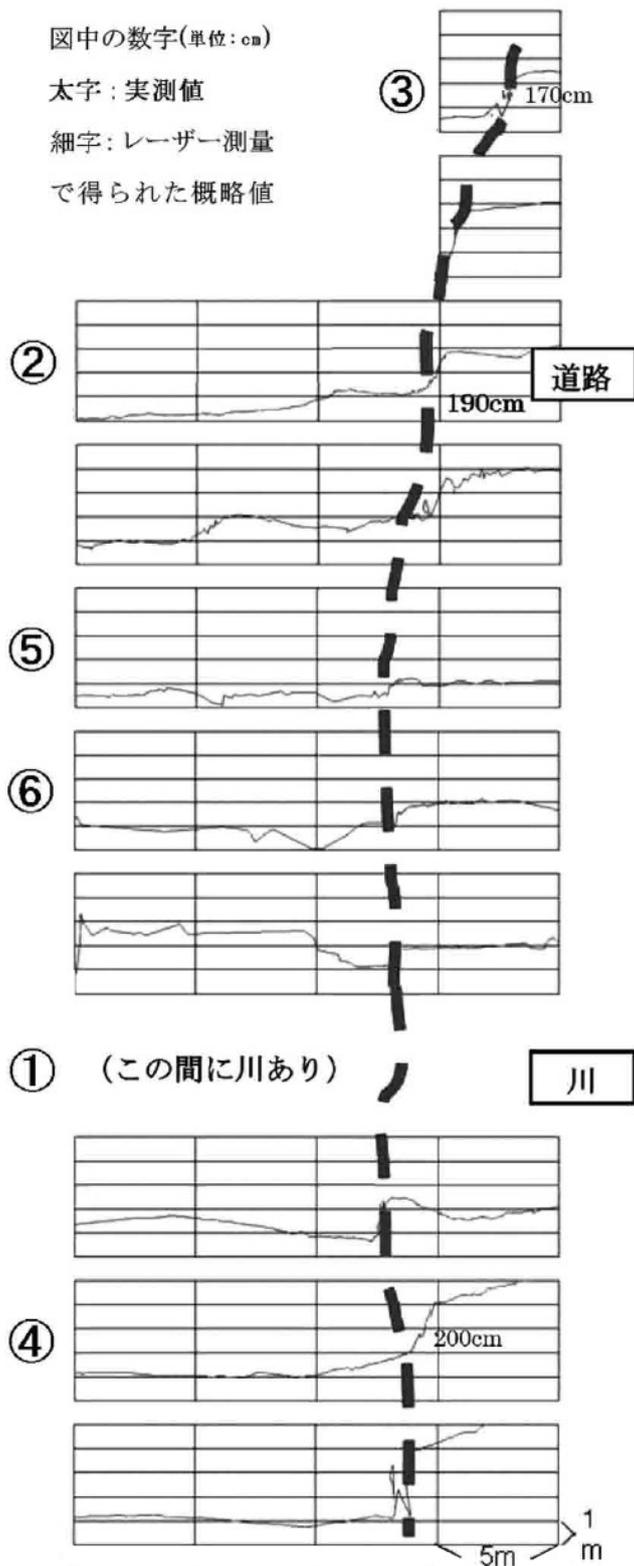


図 3.1.6 計測結果 (塩ノ平地区) (岡谷・小荒井, 2011a)

測線は 10 m 間隔で、地形断面は 1 目盛が高さ方向 1 m、水平方向 5 m である。

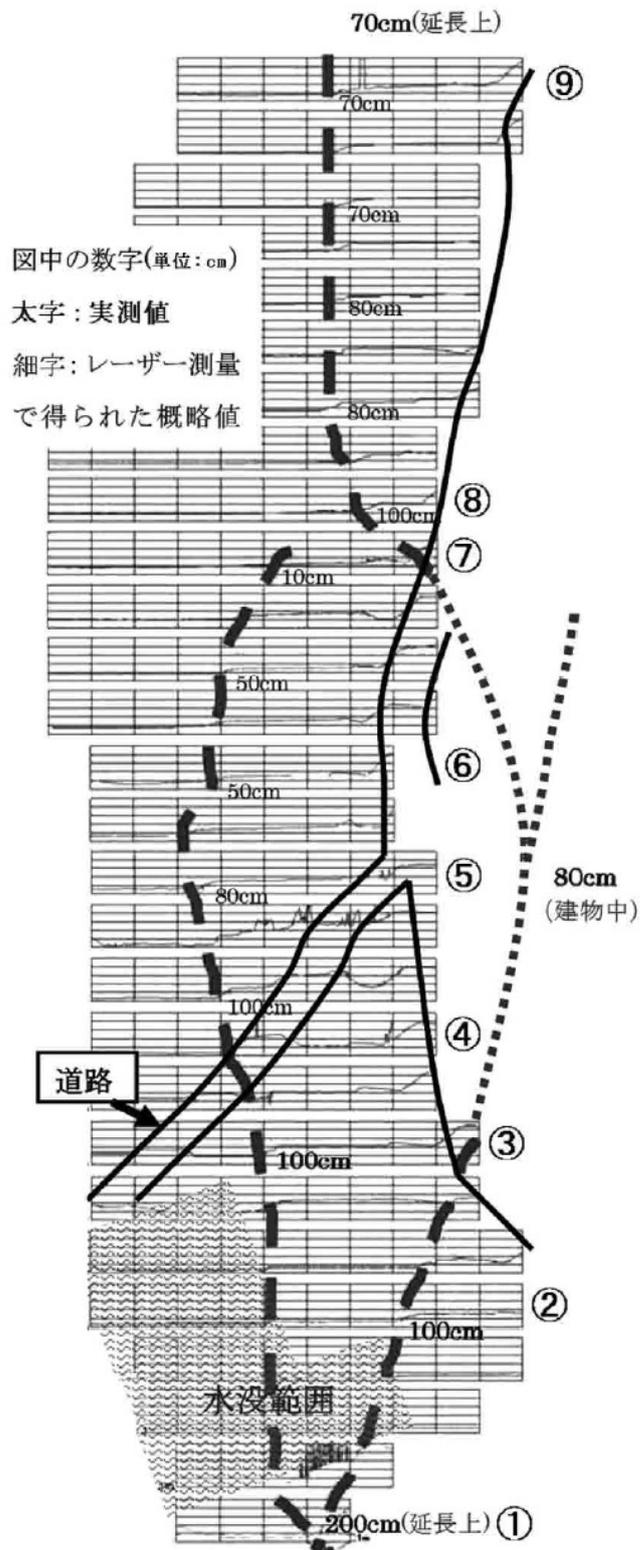


図 3.1.7 計測結果 (塩ノ平北方地区) (岡谷・小荒井, 2011a)

測線は 10 m 間隔で、地形断面は 1 目盛が高さ方向 1 m、水平方向 5 m である。

3. 2 MMSによる津波被害の把握

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)では、死者・行方不明者あわせて約2万人の多大な人的被害をもたらされたが、その多くは津波によるものであった。MMS(Mobile Mapping System: モービルマッピングシステム)は、移動しながら周囲の状況をマッピングできるシステムであり、レーザ機器やデジタルカメラを、GPS/IMU(Inertial Measurement Unit: 慣性計測装置)などの航行用センサとあわせて自動車などの移動体に搭載したものである(Li, 1997)。MMSを用いることで、トータルステーションなどと比較して効率的に地物の3次元座標が得られるとともに、画像情報も得られる。

車載した複数のデジタルカメラでビデオ画像を取得するタイプのMMSにより、上記地震に伴う津波に対して、被害を記録することを目的に国土地理院が画像取得を実施した。カメラでは周囲の360度全方位イメージを取得するが、あわせて画像同士のマッチングや、GPS/IMUで計測されたカメラの位置や傾きに関わる情報などを組み合わせた計算処理により、画像上の画素に3次元座標が結び付けられる。画像には津波の痕跡が認められ、浸水深の復元が可能と考えられるため、津波被害の実態の解明に資する貴重なデータである。これを踏まえ、MMSを用いた研究の応用を発展させるため、津波被害の把握を対象として本研究を実施する

3. 2. 1 手法

本研究ではトプコン社製IP-S2 Liteを用いた。360度全方位カメラを車上に搭載することで、連続撮影画像データとGPS及びIMU情報を同時に記録できる(画像は1秒間に16フレーム取得)。このため、3次元位置情報を持つ映像データが作成でき、空間情報の計測を可能にしている。

MMSの計測は、2011年4月には仙台空港から石巻市街にかけての地区、同年5月には南三陸町志津川から久慈市街にかけての三陸海岸に沿った地区について行われた。時間とともに建物の撤去等が進むため、震災直後に計測を実施すれば、より完全な形で津波の痕跡を計測できたが、先行した仙台平野でも約1ヶ月のタイムラグが生じた。

このタイムラグに関連して、震災後の名取市閑上地区の状況を図3.2.1に示す。地震発生翌々日(上図)では、家屋が残っている箇所でも、家屋が移動して瓦礫とともに道路を埋めている。建物が残っている状況のため、撮影ができれば浸水痕跡を多く捉えられると思われるが、MMS計測の前提となる車両が現地に入れない状況であった。MMS計測を行った4月中旬にはほとんどの道路が通行できるようになったが、流失を免れたとみられる浸水深が4m以下の家屋等の多くが依然確認可能であった。一方、地震発生約2ヵ月後(下図)では、時間が経過したため建物の一部が撤去されている。この後も建物の撤去は進み、2011年11月の現地調査の段階では、海に近い箇所では建物はほとんど残存していなかった。浸水痕の追跡は時間の経過とともに困難になるため、震災1ヵ月後のMMS計測は十分に意義があったと考える。他方、志津川から久慈にかけての三陸海岸沿いの計測は、地震発生から約2ヵ月後に実施され

た。仙台平野などの計測から更に1か月を経過していたが、それでも気仙沼市街や大船渡市街などで津波の痕跡が画像上で確認できた建物は数多く存在し、痕跡を計測できた。たとえば、津波自体又は浮遊物による建物の破壊状況や、津波中の泥による浸水痕を確認できた。気仙沼市街では2012年7月の現地調査の際にも被災建築物の撤去等は継続しており、痕跡の一部も確認可能であった。画像の取得は発災からできる限り早い方が良いが、時間が経過しても取得の意義があることが確認された。

次に、画像上での津波の痕跡の認定手法について述べる。MMSで取得された画像（以下、「MMS画像」と記す。）のイメージを図3.2.2に示す。図の赤矢印の下に水平状の水痕が確認できる。この水痕と地表との高度差を計測すればそれが津波の浸水深（以下、「浸水深」と記す。）となる。記録されたMMS画像データには、画像マッチングの要領で与えられた3次元座標が結び付けられているため、IP-S2 Liteのソフトウェア上で津波の痕跡と地表面を指定することで、2点の斜距離、水平距離、高さの差が得られる。この「高さの差」が求めるべき「浸水深」となる。これに詳細な標高データがあれば、浸水深+標高で津波の浸水高（図3.2.3の「痕跡高」。以下、「浸水高」と記す）が算出できる。津波の高さと浸水深等の関係は図3.2.3のとおりである。

津波の痕跡の認定は、津波の表面に漂う泥などにより水平に痕がつく場合（水痕）と、漂流物などが建物に衝突し破壊した際に痕ができる場合（衝突痕）がある。水痕と衝突痕により計測される浸水深には、以下の誤差要因が考えられる。

- 1) 水痕 水平な水痕が付くのは、泥を含んだ水がある程度静水状態になり、一定時間滞留した場合と考えられる。このため、内陸側で浸水深が浅くて浸水深の時間変化が小さい地域では、水痕はほぼ最大浸水深を表すと考えるが、海岸付近では最大波が泥を痕跡を残す程度にまで含んでいるとは限らないため、過小評価となる可能性が高まる。また、津波によらない建物の汚れや電線の影、壁の施工上の境目等が水平で直線状の場合は、水痕との区別が難しく、誤って計測してしまう可能性がある。
- 2) 衝突痕 津波上の浮遊物による衝突痕の場合、水面よりも高い位置に痕が残ることとなる。この場合は最大浸水深を過大評価することとなる。また、浮遊物が壁などを引き剥がす場合は、より高い位置まで破壊され、それを衝突痕と誤認する場合があります、さらに過大評価となる。一方、屋根を超えるような津波が来た場合は、衝突痕を確認できたとしても過小評価となる。

このように、衝突痕は過小評価と過大評価の両方の可能性があり、痕跡の位置が形成当時の水面からズレるケースが多いと考えられるため、水痕のほうが確度は高いと考えた。しかし、浸水深が大きい海岸付近では、津波に泥が少なく水痕ができにくいいため、衝突による破壊痕も波面に近いと判断できるものは痕跡として採用した。

IP-S2Liteが採用している画像マッチング手法は、複数画像における特徴点を自動的に追跡することで3次元座標を求めるものである。特徴点の誤認により誤差を生じる可能性があるが、大きな誤差はMMS画像上で津波の痕跡の位置を計測する過程で除去可能である。例え

ば、1階の窓に付着した水痕の高さの計測値が地上1~2mであれば妥当だが、4mなどという値が出た場合は非現実的として除去可能である。よって、MMS画像上における津波の痕跡の位置の計測では、上記の1)や2)に示したような誤認を行った場合以外では誤差は小さいと考える。これを踏まえ、取得されたMMS画像上で水痕・衝突痕の認定を行った上で浸水深の計測を行った。また、仙台平野から石巻市街にかけの範囲では、地震後に計測された航空レーザデータにより国土地理院が作成した5mメッシュDEMと組み合わせて浸水深データを作成した。この範囲は低地の幅が広く、津波の侵入が長距離にわたるため、海岸側の詳細な地形の把握とあわせて津波の浸水深の正確な把握が、津波シミュレーションの精度検証などに重要と考える。

他方、現地計測については、仙台平野から三陸北部（久慈市以南）の範囲について2011~2013年にかけて実施した。計測対象に応じて巻尺又は赤白ポールを用い、浸水深の計測単位は5cmとした。また、三陸北部（釜石市以北）では、高所にある津波の痕跡の現地計測を可能とするため超音波デジタル測高計（Vertex）も用いた。Vertexの計測単位は10cmである。これを踏まえ、MMS画像上での計測は5cm単位で実施した。以下では、MMS画像を用いて仙台以北の津波の痕跡を計測し、明らかになった浸水深と建物被害との関係について述べる。

3. 2. 2 結果及び考察

MMS画像上での浸水深の計測値と、航空レーザ測量によるDEMから、得られた浸水深の分布を図3.2.4に示す。図には同様に津波の痕跡のアーカイブ化の取組として、現地調査に基づく浸水深データを整理した、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（2012）の結果（2012年4月25日：速報値）を重ね合わせた。合同調査グループによる結果が浸水深であるため、MMS画像上で計測した浸水深についても、航空レーザ測量に基づく地盤高の値を加えて浸水深とした。浸水深を1m単位で丸の大きさで表示しているが、丸の大きさは双方でほぼ同じである。このように、MMSによる計測値は合同調査グループの観測値と概ね一致している（岡谷ほか、2013a）。

MMS画像から浸水深を計測できた箇所は、仙台平野から三陸北部までの範囲で873箇所であり、そのうち77箇所は現地調査でも津波の痕跡を確認することができた。しかし、77箇所のうち8箇所は津波の痕跡が高所にあるなどの理由で、現地計測が不可能だった。また、現地計測を行った69箇所のうち、9箇所はMMS画像上で計測したものと別のを現地調査でより妥当な痕跡と認定した。このため、MMS画像で現地調査と同様の痕跡が認定できたケースは87%（60/69）となった。この60箇所について、MMS画像上での計測値と現地計測値を比較した。結果は、75%（45/60）の箇所でMMS画像計測値と現地計測値の較差が20cm以下となり、MMS画像から概ね現地計測と同様の浸水深が計測できることが分かった（岡谷ほか、2016）。

また、MMS画像で確認された津波の痕跡が現地調査でも残存していた割合は、2012年7月に現地調査を行った南三陸町から大船渡市の範囲について、衝突痕で約1/6、水痕で約1/4で

あった。画像上で水痕を認定したケースでは浸水深がほぼ 4 m 以下なのに対し、衝突痕のケースでは浸水深が 2~10 m の範囲に満遍なく存在し被害も比較的甚大だった（岡谷ほか、2013a）。このため、衝突痕を認定した建物のほうがより多く撤去されたと考える。また、残存割合が水痕でも約 1/4 にとどまった理由として、現地調査を順次進めていく上で、時間の経過により被害建物の撤去が進んだことなどが挙げられる。先に計測を実施して後日処理できる MMS は、時間の経過により被害の把握が困難になることを回避できる点でも有効である。

MMS 画像から計測された浸水深分布を図 3.2.5 に示した。図には小荒井ほか（2011）が行った浸水域の区分が入っており、Rank1, Rank2, Rank3 はそれぞれ流失が激しいところ（流失域）、流失は顕著ではないが破壊が激しいところ（破壊域）、浸水はしているが破壊が顕著でないところ（浸水域）に対応している。それぞれの区分に対応したおおよその浸水深は、図 3.2.5 に基付けば、Rank1 で 3~4 m 以上となり、Rank2 で 1~1.5 m 以上となる。建物被害の観点で言い換えれば、3~4 m 以上の浸水深であれば建物の流失が顕著になり、概ね 1.5 m 以上の浸水深では建物の流失は少ないが瓦礫は確認される。この傾向は、仙台平野のほか石巻平野を含めた範囲で浸水深と建物被害度の対応を検証した、小荒井ほか（2015）でも同様である。小荒井ほか（2015）では、流失域が浸水深 3~4 m 以上となった理由について、この深さになると通常の建物だと 1 階の天井まで浸水するため、木造の場合に浮力が働いて流され易くなるとしている。また、砂州・砂堆などの微高地が後背地の浸水高の低下をもたらすとしており、海岸線からの距離や標高が同様であっても海岸側の地形によって浸水深が異なる可能性を示している。

このように、MMS 画像の分析により浸水深を正確に計測することで、同じ標高であっても浸水深が異なることに対する地形の影響の解析が可能になる。また、計測値は今後の浸水深シミュレーションの精度向上や、津波に対する危険地域の把握などに役立つと期待される。

本研究で用いた MMS は地物の 3 次元座標の取得にビデオカメラ画像同士のマッチングを用いるものであった。そこで、同様の手法が能動型センサのレーザ機器を搭載した MMS でも可能かどうかについて検討する。2つの手法は、地物を認定して 3 次元位置を計測する点で同様だが、以下のような違いがある（図 3.2.6）。

- 1) ビデオカメラ画像 津波を視認する画像は連続的なため、水痕などの認定は比較的容易である。左図の○や△のような連続して撮影された画像上の特徴点の追跡によるマッチングでは、特徴点の点群に 3 次元座標が与えられ、画像上の当該点群に対する計測が可能となる。一方、計測可能な箇所は特徴点に限られるため、左図の△のような例でマッチングエラーが起こった場合は、計測値に大きな誤差を含みうる。しかし、誤差が大きい場合には、計測値と画像から推定される値との乖離がみられるため、除去しやすい面もある。
- 2) レーザ機器 照射されたレーザは壁や窓ガラスから、ほぼ直接的に高い強度で返ってくる。また、計測された反射波はそのまま 3 次元座標に変換できるため、反射位置の誤認の可能性は小さい。しかし、点群だけでは津波の痕跡は視認できないため、右図のように同時に撮影されているビデオカメラ画像を用いて点群に色を付けることで、ビデオカメラ画像に準

じた画を作成して津波の痕跡を認定する。水痕に相当する反射点は赤、建物の白壁に相当する反射点は青で示した。この手法では、画像上に示される津波の痕跡が不連続な点群となるため、水平に付く水痕などが判別しづらい場合がある。例えば、右図の赤点のように点群の欠損部が多い場合や、痕跡が影になっている場合は判別が難しい。色つきの点群と、ビデオカメラ画像を並べて作業することで、点群と痕跡の結び付けはある程度容易になるが、点群の密度が低かったり痕跡が影になっていたりと結び付けが困難となる。

しかしながら、いずれの手法でも画像から痕跡を認定することで浸水深が計測可能という点は同様である。ビデオカメラ画像を用いた本研究の成果を踏まえれば、レーザ機器を用いたシステムでも、同様に精度良く浸水深が得られることが期待され、本研究の手法を活かすことができると思う。

3. 2. 3 まとめ

本研究は、災害直後の MMS 画像が津波の浸水深の高精度な復元を可能とするとともに、浸水深と建物流失等の被害の関係や、微高地の存在などの地形が浸水深に与える影響の解明に貢献することを示した。浸水高の把握の際には航空レーザ測量データも用いており、複数のセンサデータの組合せで研究の応用範囲が広がることも示した。また、本研究で扱った MMS は、地物の 3 次元座標の取得にビデオカメラ画像同士のマッチングを用いたが、能動型センサのレーザ機器を用いた MMS のデータでも、同様に津波の浸水深の計測は可能と判断された。本研究の成果は、津波の浸水深の把握やシミュレーションのほか、従来の SAR 画像や空中写真では浸水範囲以上の情報を得ることが困難であった、豪雨などに伴う洪水被害の把握についても適用可能と考える。

(3.2 図表集)



図 3.2.1 現地の状況

(国土地理院, 2016c;

上一閑上地区 2011 年 3 月 13 日撮影, 下一閑上地区 2011 年 5 月 20 日撮影)



図 3.2.2 津波の浸水深の計測例

(岡谷・小荒井, 2011b)

図の赤矢印の下に水平方向に連続する水痕が見えるためこれを計測した。

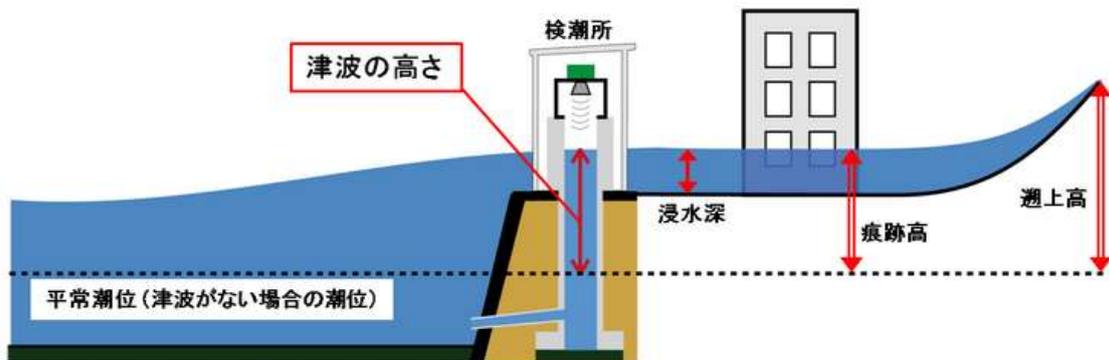


図 3.2.3 津波の高さと浸水深・痕跡高等の関係

(気象庁, 2015b)

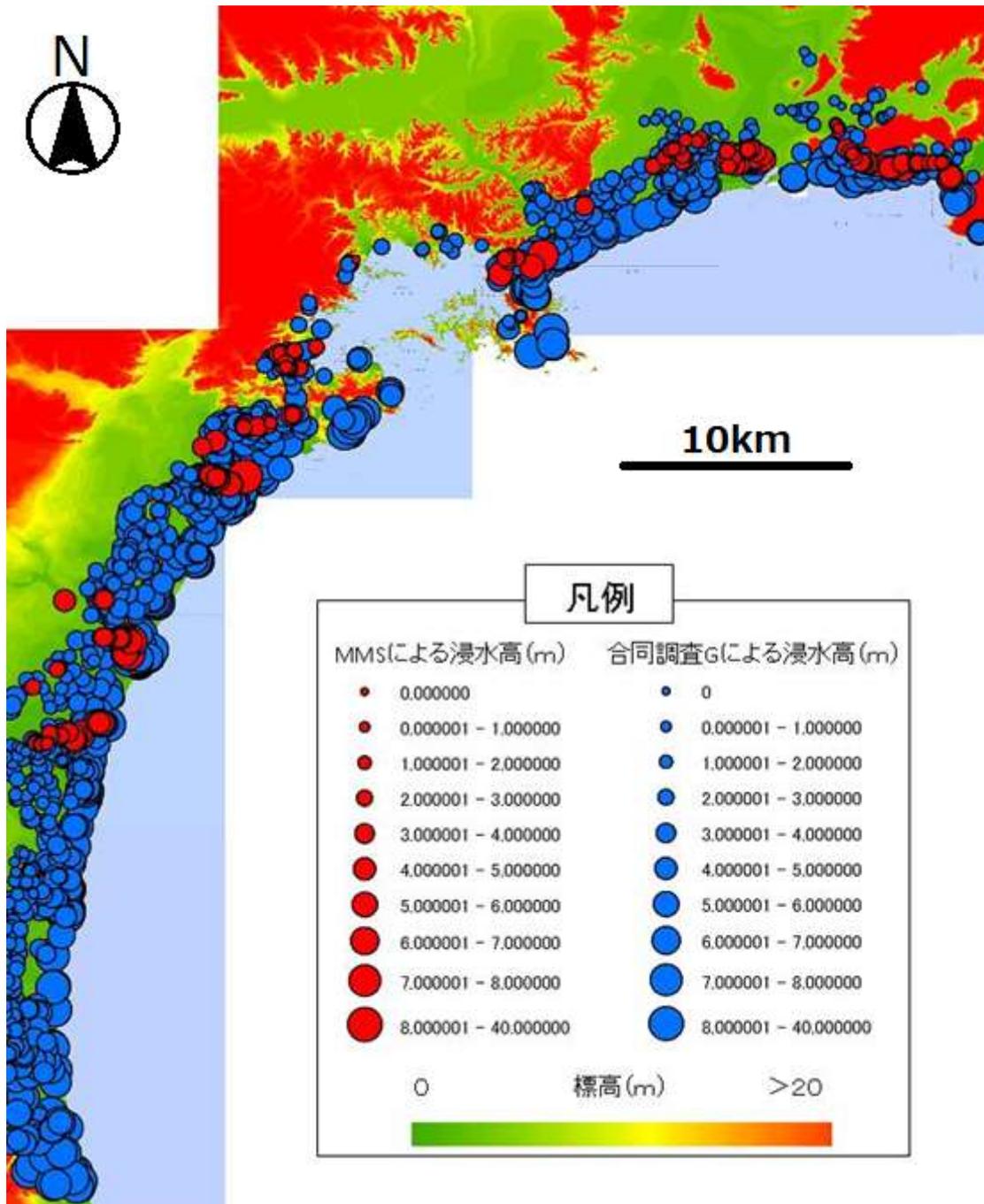


図 3.2.4 津波の浸水高の比較 (岡谷ほか, 2013a について、方位・縮尺の明瞭化を実施)

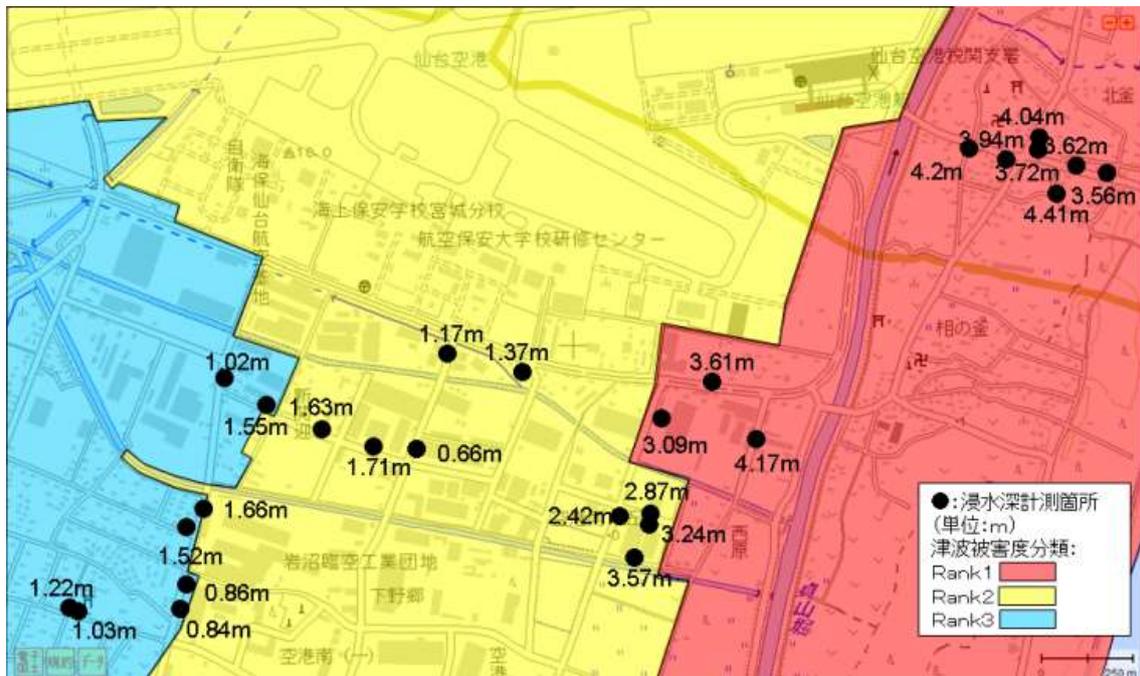
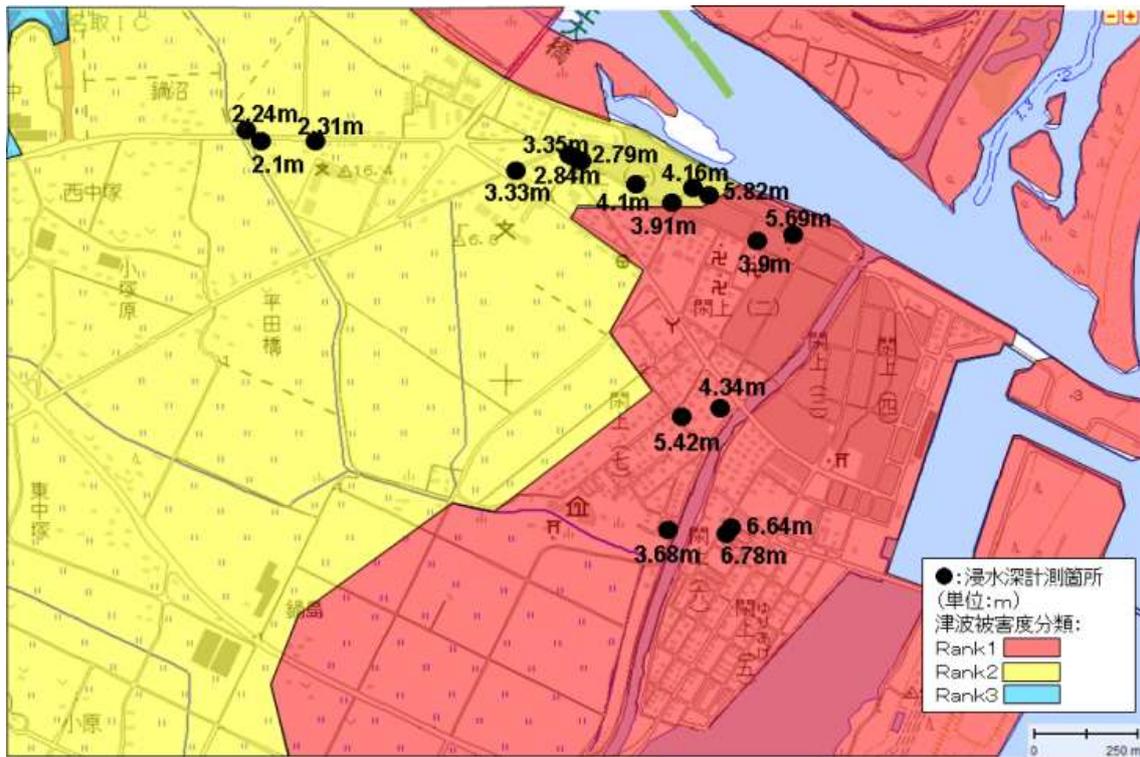


図 3.2.5 津波の浸水深と被害の状況
 (小荒井ほか, 2011; 上-関上地区, 下-仙台空港周辺)
 図の上方が北方向である。

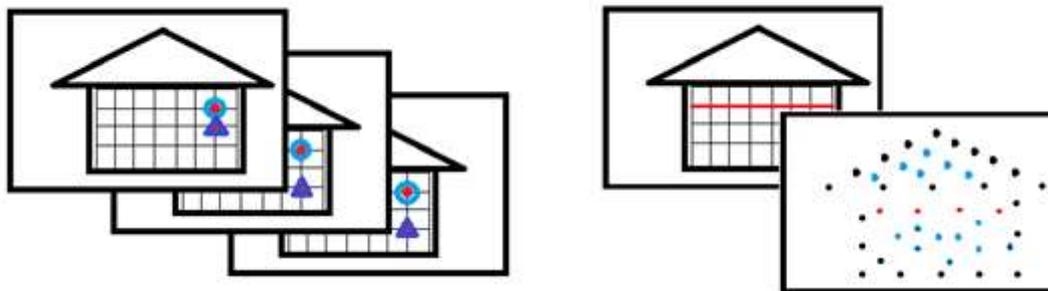


図 3.2.6 MMS のシステムの違いによる手法の対比

左図にビデオ画像型のイメージを示し、右図にレーザ機器型のイメージを示す。いずれもマッチングエラーを起こす場合について、表現をやや誇張しており、例えば左図では特徴点△の画像間のズレを強調し、右図では点群が連続的な面を形成しないことを示すため、間隙を強調して描いている。

3. 3 航空レーザによる森林の形状と斜面安定性の解析

斜面崩壊による災害は毎年のように全国で発生し、多くの人的被害をもたらしている。台風や梅雨前線等に伴う豪雨による斜面崩壊の近年の事例には、平成 21 年 7 月の山口県防府市、平成 22 年 7 月の広島県庄原市、平成 23 年 9 月の紀伊半島南部、平成 24 年 7 月の熊本県阿蘇市などがある。

斜面崩壊の起こりやすさは、従前より地形や地質の違いに影響されると指摘されているが、豪雨による斜面崩壊の発生の多寡には植生などの土地被覆も影響していると考えられる。植生の寄与の例として、表土の流出を防ぐ効果が樹木の根系にあることが、過去の研究（北原, 1998; 佐藤, 2006 など）において指摘されている。斜面崩壊には深層崩壊と表層崩壊があるが、表層崩壊は「山崩れ・崖崩れなどの斜面崩壊のうち、厚さ 0.5~2.0 m 程度の表層土が、表層土と基盤層の境界に沿って滑落する比較的規模の小さな崩壊現象のこと」（砂防学会, 2004）とされており、深層崩壊はより深い崩壊である。したがって、樹木根系による抵抗力は表層崩壊にのみ寄与するとみなせる。

地中の根系を直接計測することは困難だが、根系の最大深さと林木の胸高直径、樹高との間に関係が認められる（荻住, 1987）。このため、樹高や胸高直径などの森林形状の要素が計測できれば根系の状態を推測可能だが、それらの要素の把握を現地調査で広域的に行うことは極めて困難である。

航空レーザ測量は、主に地形情報を取得するために実施され、DEM はその主要プロダクトである。しかし、照射したレーザには、地表まで到達するもの、樹木の樹冠や幹などで反射するもの、建物の屋根や壁で反射するものなどがあり、反射波の組合せで様々なプロダクトを生成できる。例えば、観測されたレーザ点群そのものは、地面のほか樹冠や樹幹、屋根や建物の壁など様々なところからの反射波の集まりである。レーザの到達位置で特に区別しない点群データは「オリジナルデータ」と呼ばれ、地面で反射したと考えられるものだけを集めたものは「グラウンドデータ」と呼ばれる。地面まで届くレーザは、樹冠などで反射するものと比較して最後にセンサに戻るため「ラストパルス」と呼ばれる。

オリジナルデータのうち、樹冠や屋根で反射したものをつなぐように処理した仮想面が DSM である。樹冠等で反射するレーザは最初にセンサに到達するため「ファーストパルス」と呼ばれる。逆にグラウンドデータをつなぎ合わせたものは DTM となる。DEM も、DTM と同様に地盤高に相当する地形モデルを直接指す場合がある（例えば国土地理院の標高データ 5 m DEM など）。しかし、航空レーザによる森林形状・斜面安定性解析の研究では、地盤高

（DEM 又は DTM）と樹冠高（DSM）を特に区別する必要がある、DEM は DTM・DSM 双方を包括した用語として用いられることもある。そこで本章では、地盤高に相当する地形モデルに対しては DTM を用いた。DTM の演算により得られる傾斜量は、斜面安定性を解析する上で重要な要素である。航空レーザ測量の技術的説明については、国土地理院（2016d）を参照されたい。

森林に対して照射したレーザの樹冠からの反射波をつなぎ合わせた DSM は「地形+樹高」に相当し、DSM と DTM の差分として樹高が得られる。この DSM-DTM は、過去の研究では DHM (Digital Height Model) や DCM (Digital Canopy Model; あるいは、DCHM: Digital Canopy Height Model) として表現されている。例えば、Imai et al. (2004) では、DSM-DTM により建物高、樹冠高を抽出したものを DHM とし、IKONOS の衛星画像から植生域を抽出したものを DCHM としている。また、地表まで透過するレーザの割合は樹木の密集度などを反映するため、反射波を解析することによって樹木本数や胸高直径など密度に関する情報も推定できる。このように航空レーザ測量によって得られるデータは、樹高・祖密度といった森林に関する 3 次元要素を反映している。これを踏まえて、本研究では航空レーザ測量から得られる森林形状に関する情報を、「森林の 3 次元要素」と呼ぶ。

航空レーザ測量は、平野部のみならず山間部でもアーカイブデータの蓄積が進んでおり、DTM や DSM を用いた地形の解析や森林の 3 次元要素の把握に関する解析は、各地の斜面安定性の評価の精度の向上につながると考える。これを踏まえて行った、航空レーザによる森林の 3 次元要素と地形を対象とした研究について述べる。

3. 3. 1 航空レーザによる森林の 3 次元要素の把握

航空レーザ測量データからの森林の 3 次元要素を把握する初期の研究には、森林の粗密を扱った Nelson et al. (1984) や Nelson et al. (1988) があり、バイオマス量の推定などが可能なことが示された。また、樹高や樹木本数、胸高直径などを捉える研究も行われ、例えば樹高については Nelson et al. (1984) や Næsset (1997a) が林班の樹高を 1 m 程度の誤差で導出できることを示した。さらに、樹木の本数や断面積については Næsset らによる主に北欧をフィールドとした研究があり (Næsset, 1997b; Næsset and Bjercknes, 2001; Næsset, 2002, 2004 など)、常緑針葉樹の平均樹高、樹木本数、断面積和等の要素を航空レーザ測量データと回帰分析を用いて推測可能なことを示した。加えて、葉面積指数 (LAI: Leaf Area Index) を扱った Lefsky et al. (1999) や、樹冠形状の抽出について扱った Harding et al. (2001) などの研究も行われた。その後も、Kato et al. (2009) が、北米において針葉樹及び落葉広葉樹を対象として樹冠形状の抽出を行い、個々の樹木について樹高や樹冠幅等が現地の実測結果と相関良く求められることを示すなど、研究の蓄積が続いている。

国内においても、2000 年頃から樹高等を対象とした研究が活発化している (大政ほか, 2000; 田村・高槻, 2000; 瀬戸島ほか, 2002a など)。例えば瀬戸島ほか (2002b) は、サクラ保存林等の樹高を 1~2 m 程度の精度で計測できることを示し、平田 (2005a) はスギなどを対象に誤差 1 m 程度の高い精度で樹高を推定可能なことを示した。また、佐藤ほか (2006) は白神山地を対象として樹高を平均誤差 50 cm 程度で計測した事例を示している。その後、樹木本数や胸高直径などにパラメータを上げたり、林分材積などの森林資源量を扱ったりした研究 (松英ほか, 2006; 伊藤ほか, 2008, 2011 など) も行われるようになった。最近では、樹高のほかに葉群構造などを扱い、植生図等へのマッピングの検討を行った研究 (佐藤ほか, 2010b; 小

荒井ほか, 2010 など) も行われている。小荒井ほか (2010) や小荒井ほか (2012) は、景観生態学的な視点から、植生高 (樹高または樹冠高)、樹冠厚 (樹高一枝下高)、落葉樹と常緑樹の区分、落葉樹については単層と複層の区分などの植生状態に関わる要素を複合的に扱った。その結果、植生高や落葉・常緑の区分は概ね可能だが、樹冠厚や単層・複層の区分は森林の状況によっては難しいことを示した。

スギ・ヒノキなどの植林地を中心とした常緑針葉樹や、コナラ林などあまり管理されていない二次林が中心となる落葉広葉樹が、それぞれ一定の割合を占める我が国の森林の場合、北欧等で行われた研究成果をそのまま適用できない部分がある。また、国内の森林を対象とした研究は、比較的狭い範囲における高密度の航空レーザ測量データを用いたものが主であるため (例えば松英ほか, 2006 は、150 ha に対して約 9 点/m² の計測密度のデータを用いている。)、それと比較して、国土地理院や国土交通省地方整備局が広く整備を行っている 5 m メッシュ標高データ (以下、地理院地図などにおいて 5 m DEM の語が用いられているため、5 m メッシュ標高データを単に「5 mDEM」と記す。同様に、2 m メッシュ標高データも「2 mDEM」と記す。) を作成した際の計測では、レーザ点群密度が低い。我が国の航空レーザを用いた測量に対する作業規程の準則 (国土交通省, 2016a) では、5 mDEM や 2 mDEM の品質に対して DEM 間隔の格子ごとの欠測率が 10% 以下であることを標準としており、それほど高密度が求められないためである。

斜面の安定性評価について、広大なアーカイブデータを活用しようとするれば、より低密度のデータによっても森林の 3 次元要素が把握できることを示す必要がある。よって本研究では、より点群密度が低い形を想定した検討を行う。

3. 3. 2 手法

本研究の調査対象地は、新潟県中越地方の長岡市街の北西に位置する西山丘陵の北西側斜面で、行政的には稜線より北西側が出雲崎町、南東側が長岡市に属する (図 3.3.1)。本地域は、小木ノ城跡を含む北北東-南南西方向の主稜線近くをピークとする褶曲山地であり、それと直交方向にも尾根が伸びる。山頂の平坦部は少なく、30 度程度の傾斜を主とした急峻な斜面の集合である。範囲内で標高の一番低い場所は調査対象地の北端付近で標高 20~30 m 程度、標高の一番高い場所は尾根部の南部で標高 360 m 程度である。図 3.3.1 下図の範囲の北から西にかけて JR 越後線が走っており、その周辺が水田、市街地等になっている。一方、その南及び東側の大部分は森林であり、その中を概ね西北西-東南東に横切る形で何本かの大きな谷が見られる。これらの谷の土地被覆は水田だが、谷の南北は大まかに南側がスギ植林などの常緑針葉樹、北側がコナラなどの落葉広葉樹林となっている。また、中永トンネル上を南北に横切る尾根部は主に常緑針葉樹 (主に植林されたスギ) が占めている。さらに、分布する主な地質は後期中新世~中期更新世 (約 700 万年前~約 50 万年前) の堆積岩類であり、砂岩泥岩互層、シルト岩、塊状泥岩等の岩相である (小林ほか, 1993)。尾根部の周りには地すべり地形が広がっており、表層崩壊を誘発する要因になっていると考えられる。

本地域では、平成 16 年 9 月の豪雨に伴う斜面崩壊が長岡市の旧三島町域と出雲崎町の間、国道 352 号線の中永トンネル周辺で多発したほか、昭和 36 年にも同様の箇所において豪雨による斜面崩壊が多発している。本地域と重なる範囲を解析した土志田ほか（2009）は、崩壊が尾根領域の境界において多発していることを示しており、岩橋ほか（2008）は崩壊の素因として、地形では斜面の傾斜と曲率の影響が大きいことを示している。

データは、平成 19 年 11 月 8 日に実施した航空レーザ測量データを使用し、検証用のデータ取得のため平成 23 年 10 月 20～26 日に毎木調査を実施した。航空レーザ測量は、新潟県出雲崎町の西山丘陵北西方斜面の約 5 km 四方の範囲で行った（図 3.3.1 の太線枠内）。計測の諸元を表 3.3.1 に示す。このデータは、表層崩壊に関して地形の解析を行った研究（岩橋ほか、2009）のために 2 mDEM を作成する目的で取得された航空レーザ測量データ（1 m²あたり約 3 点）であり、林学分野などで用いられているものと比較するとやや低密度である。地形形状の把握を目的とした航空レーザ測量は落葉期に行うことが適しているが、出雲崎地区のような豪雪地帯では落葉を待つことで積雪が発生し、地形形状が取得できないリスクがあるため、落葉中及び落葉前（着葉期）に計測が行われるケースも多い。今回の航空レーザ測量データは落葉中の計測データだが、既存航空レーザ測量データの典型事例の一つとして採用した。具体的には、落葉広葉樹においてサクラやホウノキは落葉後となっているが、調査対象地で多数を占めるコナラやクリは落葉前となっており、全体としては着葉期に近いデータとなっている。

毎木調査は、落葉広葉樹か常緑針葉樹か、急傾斜か緩傾斜か、非崩壊地か崩壊地隣接かの違いで 10 a の方形区（20×50 m）を 8 箇所設けて実施した。当該地区は平成 16 年の豪雨等による崩壊地が多いため、崩壊地をできるだけ含まないなど条件が良好なところを選び、かつ落葉広葉樹・急傾斜・非崩壊地等の各パターンを取得できる形状として、ほぼ最大値となる 20×50 m を採用した。方形区ごとの諸元を表 3.3.2 に示す。ポケットコンパスとバーテックスを用いて、方形区の 4 隅を 1 m 以内の精度で平面位置の座標を計測し、方形区内の相対的位置を求めた。さらに、方形区近傍に GPS 測量（VRS 測量）により経緯度座標を測定した地点を設置し、方形区に接続することで方形区内の座標を絶対的位置に結び付けた。

毎木調査では、胸高直径 10 cm 以上の樹木を中心として情報を取得した。胸高直径を 10 cm 以上としたのは、森岡（1984）などにおいて立木根部の抵抗力と胸高直径との間に強い比例関係があることが示されており、崩壊防止に中心的に寄与する樹木は一定以上の胸高直径を有すると仮定したためである。取得した情報は、樹木本数、樹種、樹高、樹冠の長軸・短軸の長さ、胸高直径などである。それぞれの情報は根元の位置に割り当てられているため、斜めに成長している樹木の場合は、真上から見た樹冠頂部の位置と樹高等が記録される位置にずれが生じる。樹高測定はバーテックスを用いて実施した。胸高直径 10 cm 未満の樹木や草本層については、個々の樹木等に関わる情報取得は行わず、代わりに本数の多寡や優占種などの分布傾向の把握を行った。

次に森林の3次元要素に関する情報の取得手法の概要について述べる。先に述べた過去の研究事例を踏まえ、表層崩壊の抑止力に関わるとみられる森林の3次元要素のうち、航空レーザ測量データで把握可能と考えられる指標として以下の3つを取り上げた。

- ① 樹高 (m) ② 樹木本数 (本) ③ 胸高直径 (cm)

過去の研究事例に示されるとおり、樹高については航空レーザ測量データからほぼ相当する値が求められる可能性が高い。一方、樹木本数については樹冠の頂部を正確に把握し、数えることで計測可能と推察されるが、胸高直径については直接的な計測は不可能なので、レーザ点群のうち地表付近に透過した割合など他の指標から推定する必要がある (図 3.3.2)。

次に、解析を行うスケールについて検討を行った。航空レーザ測量は2 mDEM や5 mDEM を作成するために行われておりそれぞれデータの蓄積があるが、今回は2 mDEM の作成用に計測されたデータを使用したことを踏まえ、DSM とDTM の比較を行う解析単位は2 mメッシュとした。樹木本数のカウントは、原理的には樹冠付近ではね返るレーザ点群から生成される、樹冠頂部に接する面であるDSMのピークを数えれば、樹木本数に相当する値が得られる。しかし、DSMの密度が低いと樹幹間隔が狭い樹頂間を分離できないため、1 mメッシュに解析単位を詳細化した。DTMの作成には最近隣法を用いた。

樹高、樹木本数、胸高直径といった森林の3次元要素を、航空レーザ測量データから直接的に導出できるのが理想だが、今回用いたような2 mDEM や5 mDEM を作成する際に取得される点群データの密度は個々の森林の3次元要素を再現するには粗い (今回は約3点/m²)。このため、樹冠ではね返る点群の割合が場所によりばらつくことなどにより、個々の樹木レベルでは誤差が生じると考える。しかし、より広い範囲で解析を行えば、これらの誤差が平滑化できると期待される。このため、樹木個別の樹高・樹木本数・胸高直径を推定するのではなく、方形区全体または方形区を分割したいくつかの小方形区 (数~10 m 四方単位) で3つの指標に関連する指標を導出し、毎木調査で得られた値と比較することで、3つの指標のパラメータ化の可否を検証した。航空レーザ測量と毎木調査の間には約4年の時間差があり、同じものを見ているわけではないが、各樹木は航空レーザ測量時点の樹高・胸高直径等をベースとして成長するため、毎木調査時のこれらの値も、航空レーザ測量時の値と比例関係にあると考える。このため、航空レーザ測量データから毎木調査時における樹高・樹木本数・胸高直径に関連する指標を導出することは可能と判断した。3つの指標の導出方法は以下のとおりである。

- ① 樹高関連指標

原理的には、樹冠頂部付近のオリジナルデータと地表付近のオリジナルデータの高さの差分をとれば樹高に相当する値は得られる。前者はオリジナルデータのうち各樹冠の極大値 (すなわちDSM)、後者は地盤高 (すなわちDTM) として処理されたものを用いればよい。しかし、2 m四方だと樹冠が完全に収まらないケースが多いため、方形区との対比では10 m四方で両者の差分の最大値を求め、これを樹高に関わる指標として10 m四方メッシュ単位で妥当性を検証することとした。

② 樹木本数関連指標

原理的には、樹冠付近ではね返るオリジナルデータから生成される樹冠頂部に接する面のピークを数えれば樹木本数に相当する値は得られる。使用したレーザ点群密度の3点/m²という値は、縄村ほか（2007）においてスギ人工林における樹木本数を計測するために必要十分な密度として挙げられている。このため、以下の方法でピークを抽出した。

まず、各1mメッシュのオリジナルデータの中で最高となる点の高さの値を、そのメッシュの代表値としたDSM（以下「1mDSM」と記す。）を作成した。この1mDSMをつないだものが樹冠頂部に接する面のイメージである。一方、当該メッシュとその周囲の一周分の3×3のデータから最高となる1mDSMの値を採用する形で処理用の接峰面を算出した。1mDSMがピークとなる箇所は、周囲のメッシュより高いため、処理用の接峰面も同じ高さとなる。すなわち、処理用の接峰面と1mDSMが重なるところが樹冠頂部に接する面のピークとなる。よって、この重なる箇所（以下、「DSMピークデータ」と呼ぶ。）を取得し樹木本数に関わる指標とした。

指標の妥当性については、毎木調査結果のうち一定以上の抵抗力があると仮定した胸高直径10cm以上のものとの対比により検証を行う。具体的には、現地調査による樹木本数とDSMにより算出される樹木本数との相関をとった。DSMの間隔を1mとすることにより、樹幹間隔が3m以下の場合には樹頂が抽出できない可能性がある。また、逆に樹冠の縁であっても、周囲のオリジナルデータが樹冠付近で反射していなければこれを樹頂と誤認する可能性がある。このように、指標には過小評価、過大評価が含まれる可能性がある。もっとも、方形区1（落葉広葉樹・緩傾斜）は樹幹の細い中低木が多いため、大量の数え落としが出るのが想定されるが、これらは根系の張り方が弱く崩壊の抑止効果が低いとみられる胸高直径10cm未満のものが中心になる。このような場合は、指標の妥当性には大きな影響はないと考える。

③ 胸高直径関連指標

直接的に胸高直径を求める手法がないため、オリジナルデータのうち2mDEMとの高さの差が30cm以下となる点群、すなわちほぼ地表に到達したと見られる点群の割合（以下、「透過率」と呼ぶ。）を胸高直径に関わる指標とした。レーザの透過率が葉面積指数（Leaf Area Index）と対応関係にあることが、佐藤ほか（2008）などにより示されており、この葉面積と胸高直径が対応関係にあることがShinozaki et. al.（1964）などにより指摘されているため、透過率と胸高直径を結び付けられると考えた。指標の妥当性の検証については、②と同様に胸高直径が10cm以上となる樹木を対象に、その胸高における樹幹の断面積の和との対比により行うこととした。

3. 3. 3 森林の3次元要素の把握に関する結果及び考察

航空レーザ測量データから得られた森林の3次元要素に関わる3つの関連指標（樹高・樹木本数・胸高直径）について解析した結果と、別途実施した毎木調査との対比に基づき関連指標の妥当性を考察した結果を以下に示す。

① 樹高

各方形区は 10 a (50×20 m) の面積を有するため、10 m 四方のメッシュが方形区ごとに 10 個得られる。全 8 方形区について得られた DSM-DTM による算出樹高と毎木調査による樹高の対比結果を図 3.3.3 に示す。また、樹種等のパターンごとの算出樹高と毎木調査の樹高との比較結果について表 3.3.3 に示す。値は各パターンが対象とする 20 個の 10 m 四方メッシュから計算した。

20 箇所の 10 m メッシュに相当する、それぞれのパターンに対する相関係数は、落葉広葉樹緩傾斜=0.778、常緑針葉樹緩傾斜=0.861、常緑針葉樹急傾斜=0.737 といずれも 1%の有意水準で高い相関を示す。これに対し、落葉広葉樹急傾斜では-0.174 とほぼ無相関となる。毎木調査結果を真値とした場合の平均二乗誤差は、常緑針葉樹緩傾斜が 1.1 m と最も小さく、落葉広葉樹緩傾斜と常緑針葉樹急傾斜が 2.4~2.6 m で続き、落葉広葉樹急傾斜で 5.0 m と最も大きい。落葉広葉樹のうち、急傾斜地において算出値と毎木調査の値が大きくずれていることが特に注目される。相関が良かった 3 つのパターンについて、毎木調査樹高を X、算出樹高を Y とすると、X と Y との比 (Y/X) は、それぞれ落葉広葉樹緩傾斜=0.86、常緑針葉樹緩傾斜=0.90、常緑針葉樹急傾斜=0.98 となり、いずれも航空レーザ測量データから算出した樹高の方がやや低くなった。また、 $Y=aX+b$ の形で回帰直線を表現した場合の $aX+b$ は、表 3.3.3 のとおり、a の値は 1 をいずれも下回ったが、特に落葉広葉樹緩傾斜において 0.31 と顕著に小さかった。

算出樹高が毎木調査樹高を下回った理由としては、航空レーザ測量データ取得から毎木調査までの約 4 年間に樹木の成長があったことや、反射点が厳密には樹冠頂部を捉えられない場合があり、その分過小評価となったことなどが考えられる。落葉広葉樹は、方形区内でそれぞれの樹齢も異なるため、平均的な成長量を示すことは困難である。一方、常緑針葉樹は、樹齢 50~60 年程度のスギが主であり、新潟県 (2007) の中越地区の地域森林計画の施行体系に基付けば、当該樹齢付近の樹高の基準年増加量は 20 cm 程度であるため、4 年間の成長量は 1 m 弱と推定できる。また、 $Y=aX$ ではなく $Y=aX+b$ の形にした場合に、a の値がさらに小さくなった理由としては、樹冠頂部を透過するレーザ点群が一定程度存在し、樹高の高いものほどレーザの反射位置が樹冠頂部から乖離したことが考えられる。特に落葉広葉樹で係数が小さくなった要因としては、航空レーザ測量が 11 月 8 日に実施されたため一部で落葉が進んでおり、図 3.3.4 (落葉広葉樹におけるオリジナルデータ反射位置断面図) のように樹冠頂部を透過するレーザ点群が多数あったことが挙げられる。高さ 10 m 付近の中間層に達するレーザ点群が多くなったことで、実際の樹高の差ほどはレーザ反射位置に高さの差が出ず、b の値が非常に大きくなったと考える。

一方、落葉広葉樹急傾斜で相関が悪くなった理由について、方形区 2 の樹木形状を図 3.3.5 の左側に示す。同じ急傾斜でも相関が良かった常緑針葉樹と対比するため、方形区 8 のケースを図 3.3.5 の右側に示してある。コナラなどから構成される方形区 2 では、傾斜に沿って樹木も倒れ込んでいるため、根元位置と樹冠頂部の位置にずれが生じる。樹高は根元位置を基準と

して計測しているため、毎木調査での樹冠頂部における地表からの高さは斜面の傾斜分だけ過小評価される。また、斜面の傾斜も全く一様ではないこと等から、過小評価量にもばらつきが生じる。このため、落葉広葉樹の方形区では急傾斜地で樹高が適切に算出できなかったと考えられる。一方、常緑針葉樹のケースでは根元位置付近から幹が真上方向に伸びているため、樹冠頂部と根元位置のずれは小さく、落葉広葉樹のような過小評価は起こらなかったと考える。

結果として、航空レーザ測量によるデータ取得と毎木調査との間には4年の時間差があるが、DSM-DTMによる算出樹高を用いることにより、急傾斜の落葉広葉樹林を除いて有意な相関が認められた。また、急傾斜の落葉広葉樹林におけるズレも、樹冠頂部位置と現地調査で樹高を割り当てた根元位置とのズレを反映したと考えられるため、航空レーザ測量データに基づく算出樹高は関連指標として妥当と考える。

② 樹木本数

樹木本数は、DSM ピークデータの数を方形区ごとにカウントすることで算出した。各方形区における樹木本数の算出値と毎木調査による樹木本数の実測値の対比は表 3.3.4 のとおりである。また、10 m 四方の小方形区ごとの本数について算出値と実測値を対比したものを図 3.3.6 に示す。実測値の合計が 560 本に対して算出値の合計は 411 本となっているため、約 26% の過小評価となった。落葉広葉樹では実測値 270 本に対して算出値 199 本 (26% 過小)、常緑針葉樹では実測値 290 本に対して算出値 212 本 (27% 過小) のため、2 つの樹種間で過小評価の傾向に違いはほとんど無い。しかし、緩傾斜では実測値 283 本に対して算出値 230 本 (19% 過小)、急傾斜では実測値 277 本に対して算出値 181 本 (35% 過小) であり、急傾斜地で数え落としが多い。急傾斜地では斜面下部にある樹冠のピークと斜面上部にある樹冠の縁辺部との高度差が相対的に小さくなるため、ピークが捉えづらくなり、より過小評価になったと推察される。

これを踏まえ、10 m 四方の小方形区単位でそれぞれのパターンに対して分析を行った結果を表 3.3.5 に示す。落葉広葉樹緩傾斜、落葉広葉樹急傾斜、常緑針葉樹急傾斜は本数のカウントの誤差が大きい (2.6~3.7 本) とともに、相関係数が小さく無相関となっている。無相関になった理由としては、急傾斜地ではピークを上手く捉えられていないためと考える。また、落葉広葉樹の緩傾斜地では、胸高直径 10 cm 以下の中低木が多く、これらは DSM の解析でピークと認識される可能性があるが、実測値からは除かれているため、相関が悪くなったと推察される。

一方、常緑針葉樹緩傾斜では実測値を真とした場合の平均二乗誤差が他と比べ小さく、相関係数も 1 % の有意水準で高い相関となった。常緑針葉樹林には 10 cm 以下の中低木が少ないため、DSM の解析で得られるピークはほぼ毎木調査でカウントされているものと同じであり、高い相関をもたらしたと考える。図 3.3.7 は方形区 5 (常緑針葉樹・緩傾斜) での例である。小方形区ごとの実測本数に対する DSM からの指標値の割合は 0.7~1.6 程度となっているが、同様のパターンとなる方形区 7 とあわせ、全体では高い相関となっている。これにより、常緑

針葉樹緩傾斜であれば小方形区に基づき樹木本数の関連指標を適切に得られることが分かった。

また、30度を超える急傾斜地で数え落しが多かったことを踏まえ、急傾斜に伴う数え落しが無かったとした際の効果についても検討した。すなわち、抽出本数が65%となった急傾斜地でも、傾斜の影響がなければ緩傾斜地と同じ81%抽出できたと仮定し、急傾斜4方形区の算出樹木本数を $81/65 \approx 5/4$ 倍して、全8方形区の実測本数とDSMによる指標値の相関を取った

(図3.3.8)。その結果、相関係数は0.816(5%で有意)となった。このため、急傾斜による数え落しの影響を考慮すれば、 $20 \times 50 \text{ m}$ という多数の樹木を包含する範囲で捉えることで、樹木本数に対応する関連指標が得られる可能性があると考ええる。

関連指標が全体的に過小評価になったという問題については、もう少しデータ密度を上げれば過小評価の幅を縮めることができると考える。例えば、植林地を対象として樹木本数の計測を行った松英(2006)ほかでは、航空レーザ測量データを10cm四方にリサンプリングした上で 17×17 のウインドウを用いて樹頂抽出を行っている。本研究では、レーザ点群密度がやや低いことからウインドウサイズを1m四方のデータから 3×3 としたため、樹頂が十分に抽出できなかった可能性がある。しかし、5mDEMの整備のために取得した航空レーザ測量データは更にデータ密度が低いため、算出値と実測値の乖離は更に大きくなる可能性がある。約3点/ m^2 の点群密度データを扱った本研究では傾斜補正が有効である可能性が示されたが、より点群密度が低いデータを用いる場合は、計測範囲の拡大や対象の限定など、相関を高めるための更なる検討を要すると推察する。

③ 胸高直径

胸高直径に関わる関連指標の算出には、オリジナルデータのうち地表付近に達するものの割合(透過率)を用いた。まず、各方形区内の10m四方メッシュの小方形区ごとの透過率と胸高断面積和の比較を行った(図3.3.9)。落葉広葉樹では透過率と胸高断面積和の相関は見られなかったが、常緑針葉樹では全体として透過率が小さいほど胸高断面積和が大きくなる傾向が見られた。しかし、図3.3.9中の方形区5や方形区7における分布のとおり、方形区の中でみると、必ずしも個々の小方形区での透過率の大小が胸高断面積和の大小に結びついていないことが分かる。すなわち、胸高直径に関わる関連指標も樹木本数と同様に小方形区ごとではなく、 $20 \times 50 \text{ m}$ のより大きなまとまりで見ること、全体の傾向として透過率と胸高断面積和の逆相関関係が確認できると考えられる。

これを踏まえて、表3.3.4に各方形区における透過率の平均と胸高断面積和をまとめるとともに、図3.3.10にその関係を示した。透過率が低ければ胸高断面積和も大きいことが期待され、それが樹木本数の効果を差し引いても大きいままであれば、胸高直径も大きくなることが期待される。しかし、落葉広葉樹では、透過率が方形区3で約19%、方形区4で約7%と異なるにもかかわらず、胸高断面積和にはほとんど差がなかった。また、方形区1と方形区3で透過率と胸高断面積和の関係が逆転したりするなど、明確な関係は得られなかった。一方、常緑針葉樹では、方形区6、7、8について、透過率が $6 < 7 < 8$ で胸高断面積和が $6 > 7 > 8$

と、透過率と胸高断面積和に期待した関係がみられた。しかし、方形区5だけは胸高断面積和が低く外れる傾向が見られた。これを踏まえ、方形区5が他と傾向が異なった理由について現地の状況から検討した。図3.3.11は、方形区5と方形区8の林内写真である。方形区8のスギ林では、樹冠と地表の間の枝葉がほとんどなく管理状況が良いことが分かる反面、方形区5のスギ林では、枝打ちが十分には行われておらず、地表からやや高いところに多くの枝葉が確認される。

以上を踏まえて、枝の残り具合と関連する中間層の反射について検討した。オリジナルデータにより、常緑針葉樹の各方形区の断面図を作成した結果を図3.3.12に示す。図のとおり、航空レーザ測量データから方形区5と方形区6～8で管理状況が異なることが明らかとなった。方形区6～8は高さ5～15m付近（以下、「中間層」と呼ぶ。）の反射点が極めて少ないが、方形区5は中間層も含めて、地表から樹冠まで満遍なく反射点が存在することが分かる。方形区5について、中間層の枝葉の部分で反射しているものを地表まで透過したと仮定すれば、透過率は増加し、透過率と胸高断面積和の関係は逆相関関係となる。すなわち、中間層反射率と地表付近到達度を併用することで、スギ植林地については胸高断面積和と枝打ち作業の状況の双方に関わる情報を得られる可能性がある。森林の3次元要素に関する研究成果は、林学等の分野で成果が出ているところであり、数km²にわたるデータ取得もみられる。しかし、航空レーザ測量のアーカイブデータからオリジナルデータが活用できれば、中間層反射率は広域的に算出可能な値であるため、枝打ち状況などの森林管理指標に相当するものが今後得られる可能性はある。

3. 3. 4 斜面安定性の評価への寄与についての検討

航空レーザ測量データを用いた森林の3次元要素の把握に関する検討結果を踏まえて、以下では得られた指標の中でも最も信頼度が高かった「樹高」を用いて、斜面崩壊に対する安定性評価の高度化への寄与を分析した結果を示す。ここでは、斜面安定性の評価の高度化に資するため、DEMの解析により得られる傾斜量などの地形要素との組み合わせを行った。

本研究では、調査範囲を30m四方のメッシュに分割し、それぞれのメッシュにおいていずれも航空レーザ測量データから得られる樹高指標・傾斜量と崩壊の有無を対比した。メッシュの大きさを30mとしたのは、矩形が小さすぎると崩壊後のメッシュに樹木がほとんど入らないケースが増えるため、崩壊前にあった樹木の樹高が復元できないケースが増加すると考えたからである。30mメッシュを用いれば、多くのケースで樹木は残存するため、その中の最高値を取れば当該メッシュに元々あった樹木の樹高が得られると考えた。もし崩壊した場所に周囲よりも高い木が孤立していれば、崩壊後の樹高指標は大幅に変わってしまうリスクはあるが、平均値を用いる方法を採用すると崩壊地で値が低くなるなど別の問題が生じる。このため、樹高についてメッシュ内の最高値を採用する手法が、総合的にエラーが少ないと判断した。

樹高指標・傾斜量と崩壊の有無を対比した結果を図 3.3.13 に示した。傾斜が 15 度以下の場合にはそもそも崩壊が少なくなる傾向があるが、15 度を超える場合には樹高指標 20 m を下回る場合に急激にメッシュ内に崩壊を含む確率（以下、「崩壊率」と呼ぶ。）が上昇している。特に崩壊率が 2 割を超えるケースは、樹高指標が 20 m 未満でしか確認されておらず、傾斜と樹高から斜面崩壊への耐性が判定可能なことを示している（岡谷ほか, 2013c）。この 20 m という樹高は、新潟県（2007）によるとスギの植林地では林齢 50 年にほぼ相当するため、2004 年に発生したような規模の豪雨に対して斜面安定性を保持するには、かなり長期間にわたる根系の成長が必要なことを示している。

今回は樹高の斜面安定性への寄与を検討したが、樹木本数や胸高直径も根系の斜面崩壊への抵抗力に関連していると考えられる。このため、これらの関連指標がより高い精度で得られるようになれば、斜面崩壊の発生可能性の予測精度をさらに高められると考える。

3. 3. 5 まとめ

航空レーザ測量データを利用し、森林の 3 次元要素の把握を行うとともに、得られた要素を斜面の安定性評価に適用した。反射波データから DTM、DSM、透過率などを求め、森林の 3 次元要素の指標化を行った。結果は以下のとおりである。

- ・樹高…急傾斜の落葉広葉樹を除き関連指標を導出できる。急傾斜の落葉広葉樹では現地調査樹高とレーザ算出樹高が不一致だった理由は、平面上の計測位置の違いと考えられる。
- ・樹木本数…緩傾斜の常緑針葉樹では、樹木本数に関わる指標を 10 m のメッシュサイズで概ね導出可能である。その他では、10 m メッシュでは指標を得ることは困難だが、急傾斜地の影響を考慮し、20×50 m という大きな範囲を取ることで、関連指標を導出できる可能性を示した。
- ・胸高直径…オリジナルデータの地表付近への透過率からは、落葉広葉樹では対応する値を得ることは困難である。しかし常緑広葉樹（スギ植林）では、枝打ちの状況等を中間層反射率で考慮することで、関連指標を導出できる可能性を示した。

さらに、森林の 3 次元要素に関連する指標の中でも最も信頼度が高かった「樹高」を用いて、同様に航空レーザ測量データから得られる斜面傾斜量との組合せによる、斜面崩壊に対する安定性評価の高精度化への寄与について検討した。傾斜量との対応では、15 度を超える斜面で崩壊が特に多くなる傾向が確認され、樹高指標との対応では、20 m 未満の箇所について崩壊が特に多くなる傾向が確認された。このため、傾斜量や樹高はともに斜面崩壊への脆弱さと関係すると考える。

林学の研究では、スギの植林地などにおいて森林の更新後 10~15 年の頃に崩壊が多発し、その後は斜面の安定度が増加すると示唆されている（駒村・渡辺, 1977 など）。これは、樹高が大きくなると崩壊が起りづらくなるという本研究の結果と整合的である。また、Iwahashi et al. (2014) は防府地区を対象とした研究で、傾斜・凹凸の地形量のみよりも樹高や樹木祖

密度を考慮した方が谷筋の急斜面で斜面の安定性評価の正答率が改善することを示している。このように、地形と森林の3次元要素の組合せの重要性は、他の研究においても示されている。さらに、本研究の成果はマニュアル化されており（国土地理院, 2015b）、航空レーザ測量データから地形量や森林の3次元要素を取得し、斜面安定性の評価を高度化する手法が汎用化されつつある。

(3.3 図表集)

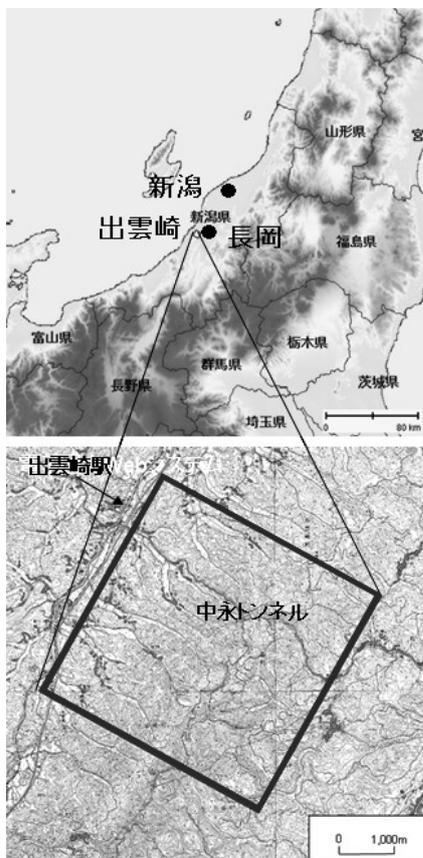


図 3.3.1 新潟県出雲崎地区の位置と地形

(岡谷ほか, 2013b)

図の上が北方向である。

表 3.3.1 航空レーザ観測諸元 (岡谷ほか, 2013b)

項目	パラメータ設定値
対地高度	1676.4 m
サイドラップ	61.20%
パルスレート	61,500 Hz
スキャン角	26°
スキャン回数	40.0 回/秒
ビーム径	0.22 mr@1/e ²
パルスモード	1 ~ 4 パルス
計測方向	北東から南西あるいは 南西から北東

表 3.3.2 毎木調査諸元 (岡谷ほか, 2013b)

方形区	森林類型	傾斜 (平均傾斜)	崩壊地との隣接性	備考
1	落葉広葉樹	緩傾斜 (5°)	隣接	崩壊地含む。コナラ・アカマツ・ホオノキ混生
2	落葉広葉樹	急傾斜 (40°)	隣接	下部に崩壊地隣接。コナラ優占
3	落葉広葉樹	緩傾斜 (5°)	非隣接	コナラ優占
4	落葉広葉樹	急傾斜 (35°)	非隣接	コナラ優占
5	常緑針葉樹	緩傾斜 (20°)	隣接	崩壊地隣接植生と見られる。スギ、間伐有
6	常緑針葉樹	急傾斜 (35°)	隣接	崩壊地隣接植生と見られる。手入れが悪く、過密なスギ植林(870本/ha)
7	常緑針葉樹	緩傾斜 (10°)	非隣接	管理の良いスギ植林
8	常緑針葉樹	急傾斜 (35°)	非隣接	小崩壊地含む。スギ、刈り払いと雪害でやや疎

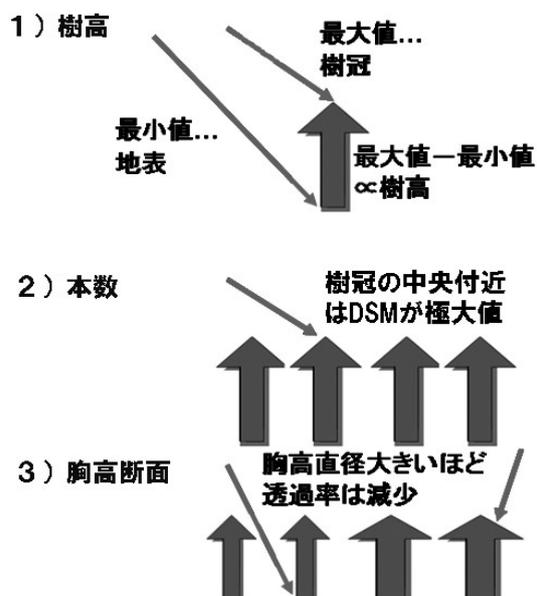


図 3.3.2 レーザの反射と樹高・本数・胸高断面との関係 (岡谷ほか, 2013b)

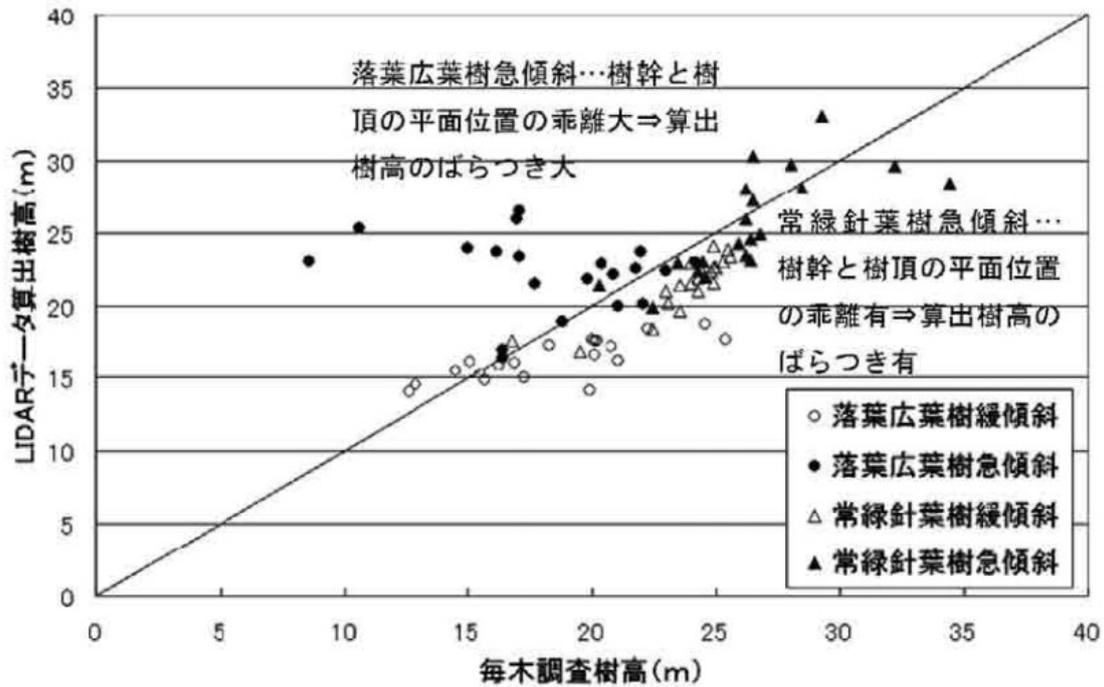


図 3.3.3 航空レーザ測量データ (LIDAR データ) による算出樹高と毎木調査による樹高の対比 (岡谷ほか, 2013b)

表 3.3.3 樹種等パターンごとの算出樹高と現地調査による樹高との関係 (岡谷ほか, 2013b)

	落葉広葉樹緩傾斜	落葉広葉樹急傾斜	常緑針葉樹緩傾斜	常緑針葉樹急傾斜
平均二乗誤差(m)	2.6	5.0	1.1	2.4
相関係数	0.778	-0.174	0.861	0.737
有意性	1%	X	1%	1%
$Y = (aX)(m)$	0.86X	-	0.90X	0.98X
$Y = (aX+b)(m)$	0.31X+10.6	-	0.81X+2.2	0.83X+3.6

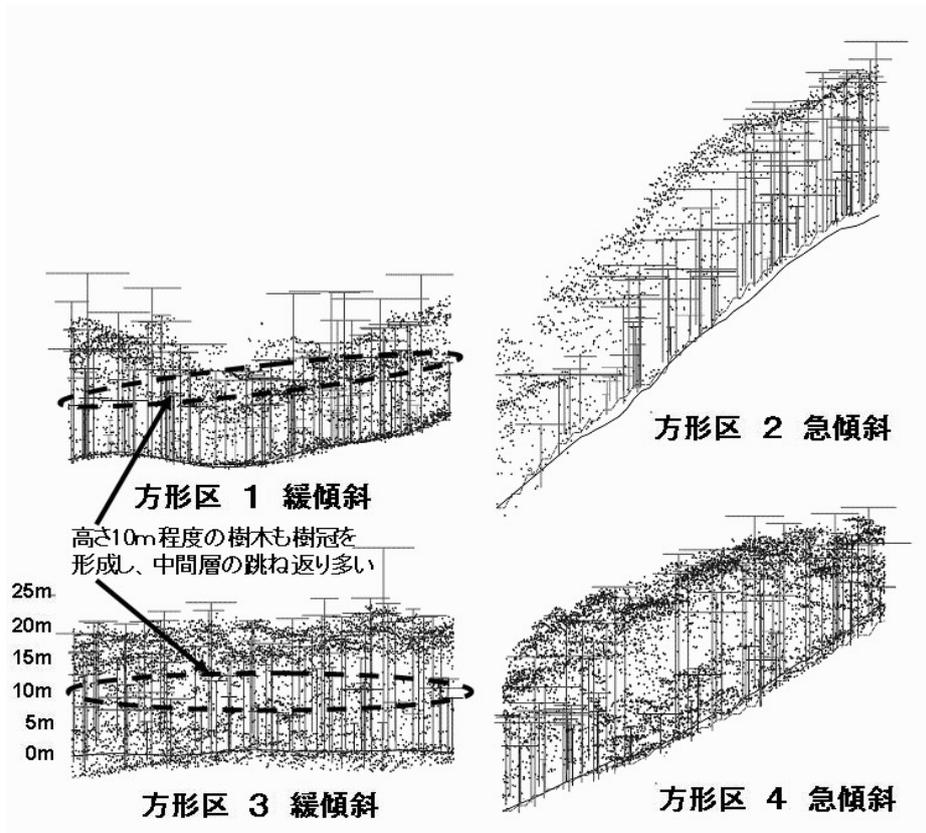


図 3.3.4 方形区 1～4（落葉広葉樹）におけるオリジナルデータ反射位置断面図（岡谷ほか, 2013b）



図 3.3.5 方形区ごとの樹木形状の比較（岡谷ほか, 2013b をカラー化）
左図が方形区 2 を示し、右図が方形区 8 を示す。

表 3.3.4 方形区ごとの各指標の分布（岡谷ほか, 2013b）

（胸高断面積和: cm²、本数: 本）

方形区	本数 (実測値)	本数 (算出値)	胸高断面積和 (実 測)	透過率 (LIDAR)
1	66	52	24900	15.1%
2	64	48	43200	4.8%
3	80	60	37700	18.7%
4	60	39	36500	7.1%
5	50	51	54500	12.6%
6	74	48	97400	4.6%
7	87	67	74600	10.3%
8	79	46	60400	17.4%
平均	70	51	53650	11.7%

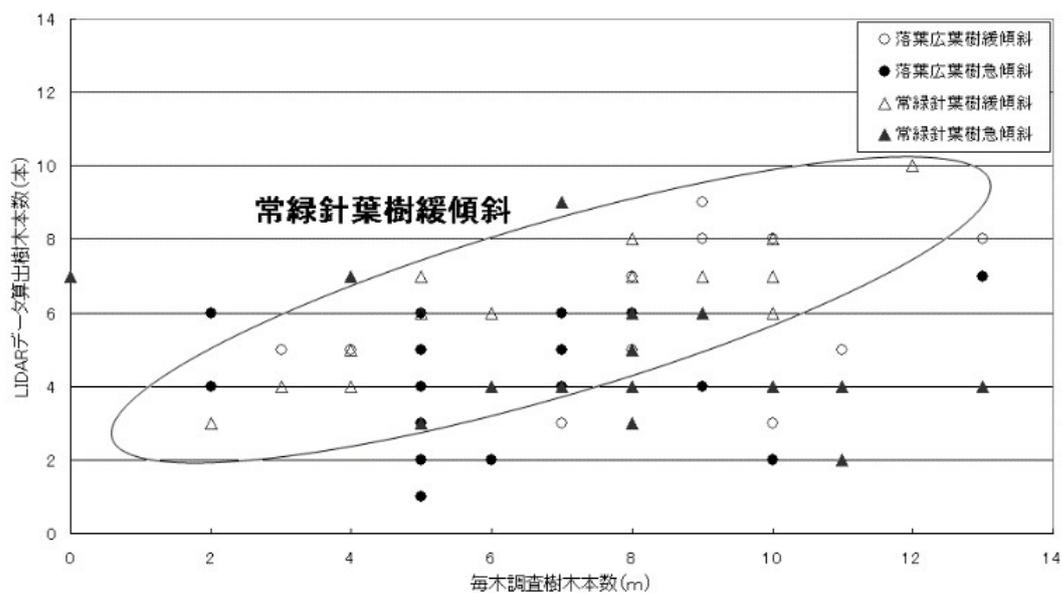


図 3.3.6 航空レーザ測量データ (LIDAR データ) による算出樹木本数と毎木調査による樹木本数の対比（岡谷ほか, 2013b）

10 m 四方メッシュごとに対比した結果を示す。

表 3.3.5 樹種等パターンごとの算出樹木本数と現地調査による樹木本数との関係
(岡谷ほか, 2013b)

	落葉広葉樹緩傾斜	落葉広葉樹急傾斜	常緑針葉樹緩傾斜	常緑針葉樹急傾斜
平均二乗誤差(m)	2.6	2.7	1.7	3.7
相関係数	0.334	0.169	0.790	-0.393
有意性	X	X	1%	X

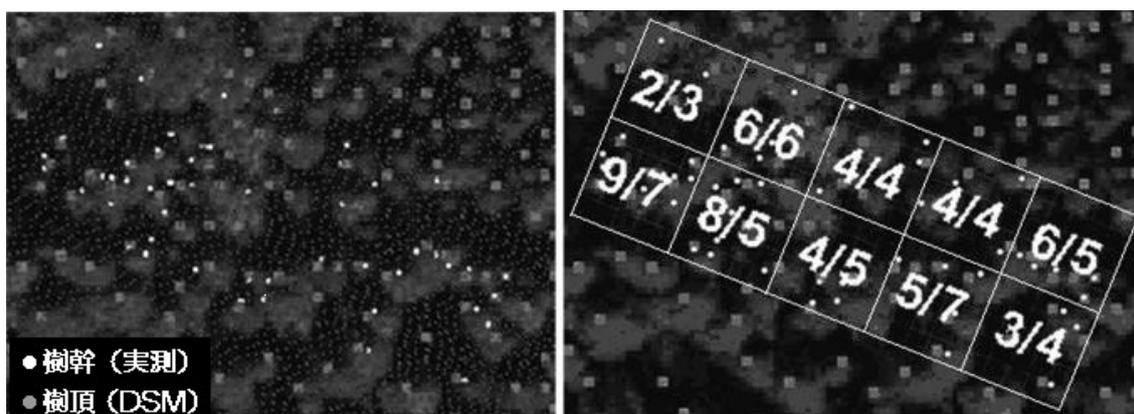


図 3.3.7 実測による樹幹位置と DSM の解析で得られたピークの関係 (左) 及び 10 m 四方メッシュごとの本数対比 (右) (岡谷ほか, 2013b)
右図の数値は「実測/DSM」の形式で示した。

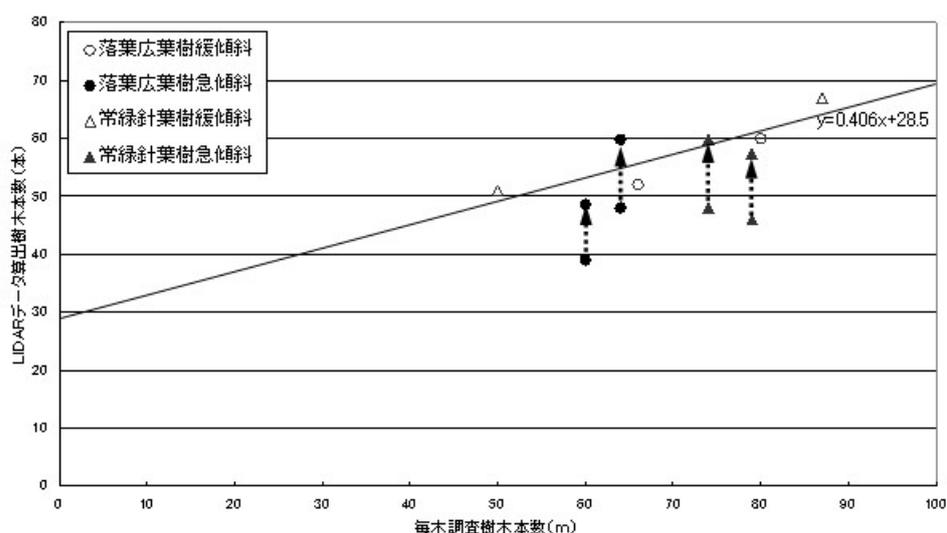


図 3.3.8 航空レーザ測量データ (LIDAR データ) による算出樹木本数と毎木調査による樹木本数の対比 (岡谷ほか, 2013b)
方形区ごとの対比の回帰直線は傾斜補正後のものを示す。

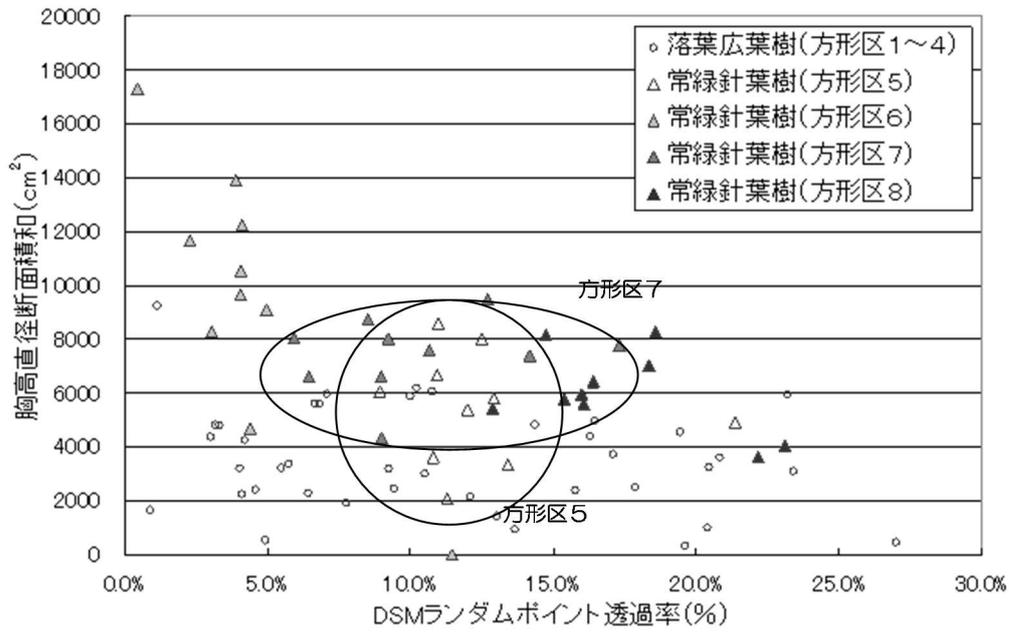


図 3.3.9 オリジナルデータの地表付近透過率と胸高断面積和の関係
(岡谷ほか, 2013b)

10 m 四方メッシュごとに対比した結果を示す。

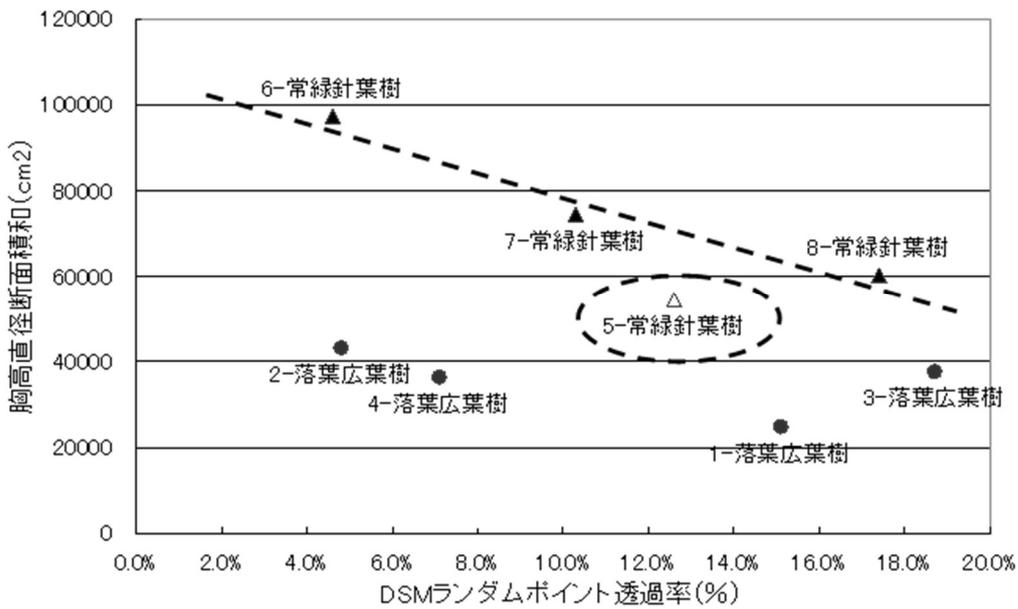


図 3.3.10 オリジナルデータの地表付近透過率と胸高断面積和の関係
(岡谷ほか, 2013b)

方形区ごとに対比した結果を示す。



図 3.3.11 方形区 5 (左) と方形区 8 (右) の比較 (岡谷ほか, 2013b をカラー化)
 中間層の植生状態に差異がみられる。

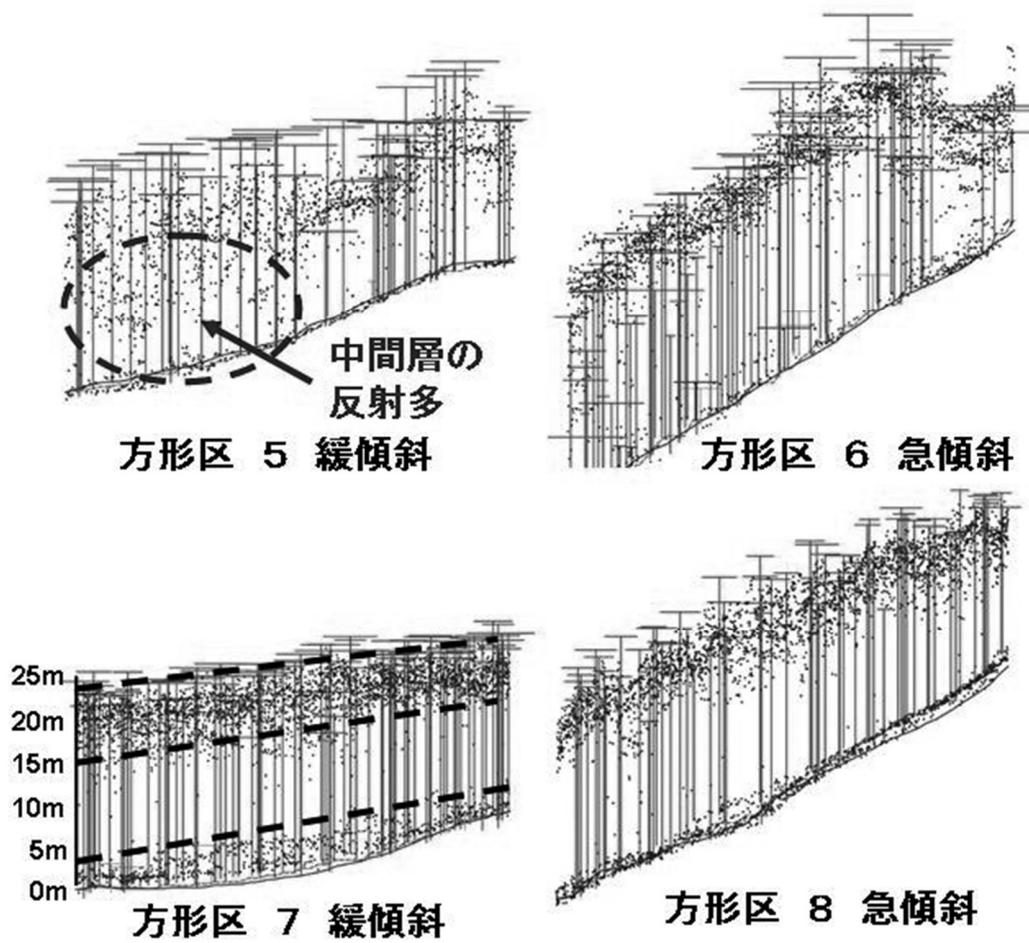


図 3.3.12 方形区 5～8 (常緑針葉樹) におけるオリジナルデータ反射位置断面図
 (岡谷ほか, 2013b)

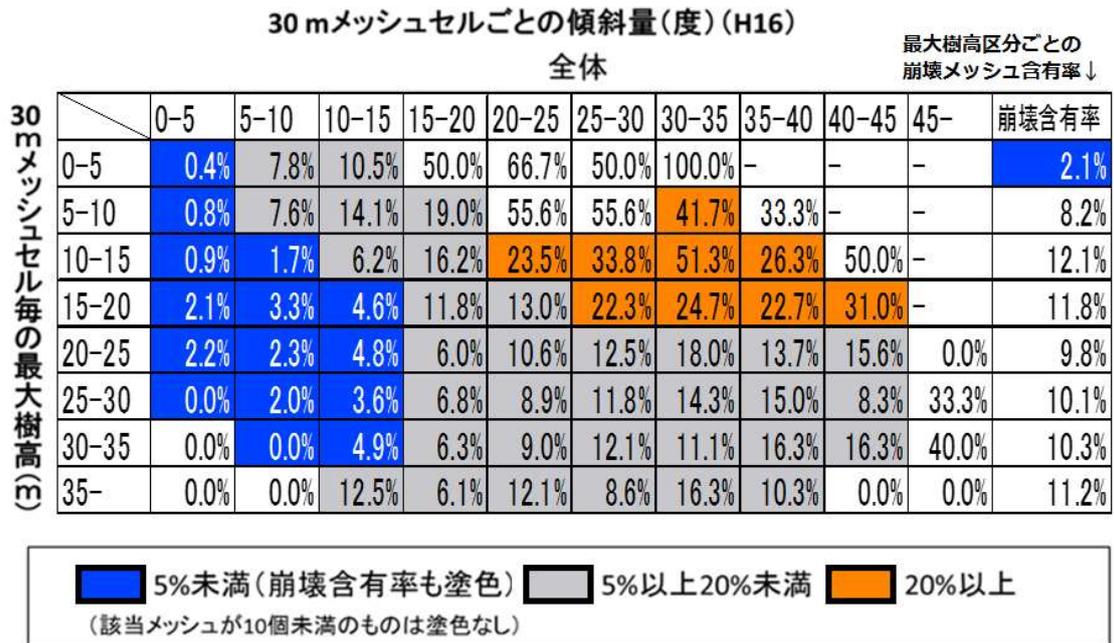


図 3.3.13 樹高指標、斜面傾斜量と崩壊発生率との関係

(岡谷ほか, 2013c を一部改変)

最大樹高は 30 m メッシュに 225 (15×15) 個ある 2 m メッシュの DSM-DTM 差分のうち最大となるものを採用した。

4. 考察

4. 1 能動型センサの特性

自然災害に対する地形の把握と解析を中心に、リモートセンシング能動型センサの応用を発展させるために、以下の3つを具体的な目的として本研究を実施した。

- 1) SAR や航空レーザなどに代表される能動型センサの2つの主領域「レーダー」「レーザ」について、SAR、航空レーザ、地上レーザ、MMS などの多様なセンサをカバーする形で検討を行い、それぞれにおける結果を評価する。
- 2) 「基礎的地形データ作成」と「地形データを用いた応用」の観点をとともに含む形で研究テーマを設定し、それぞれについて事例研究を行う。
- 3) 数百 m 四方の範囲で数 cm の高度差が注目されるマイクロなスケールから、高さ精度は相対的に低くても全球レベルを扱うようなマクロなスケールまで、多様な分解能・スケールを含む形で研究テーマを設定し、それぞれについて事例研究を行う。

結果として、表 4.1.1 のとおり多様なセンサ・プロダクトを用いた成果を提示できた。これは、能動型センサの応用が優位性を持っていたためと考えるが、この点について以下で総合的な視点から検証を行う。

まず、本研究の成果を踏まえて、受動型センサなどを含む各手法のメリット・デメリットを表 4.1.2 に整理した。現地調査では、調査対象へのアプローチが可能なら、あらゆる観測対象の情報を詳細に得られるが、対象が広域、詳細なほど実施が困難になる。空中写真は、調査対象の視認が容易で、アーカイブを使えば安価に情報が取得できる。さらに写真測量による DEM の作成や、DEM の差分から地形変化を把握することも可能なため、地形の把握・解析の基本データとなる。ただ、積雲・噴煙・植生の下の地形情報はほぼ得られず、DEM の差分の精度は数十 cm 以上と地すべりの移動の把握などには不足する。また、1 枚の写真がカバーする範囲は数 km 四方程度で、国・地域レベルなどの広域の把握には向かない。したがって受動型センサや能動型センサの応用が必要となる。

LANDSAT 等の人工衛星に搭載される光学センサは、受動型センサの代表例であり、分解能が低いデータは安価で広域の把握に向く。また、SPOT 衛星が打ち上げられて以降、光学センサの観測データから地形データを作成した研究が多数行われている（村井, 1987; Konecny et al., 1987; Ley, 1988 など）。しかし、分解能が低いデータからは、得られる地形モデルの高さ精度も低い。また、高分解能衛星の観測データはアーカイブでも高価なため、災害発生時の地形の把握等に用いられた例は少ない。さらに、積雲・噴煙・植生の下の地形情報も、空中写真と同様に得づらい。

他方、能動型センサでは、マイクロ波や近赤外線を対象に照射した反射波を観測してデータ化するため、直接画像化されたものを見ても、何が写っているかの判別は容易ではない。このため、空中写真や地図など観測対象を判別可能な資料を併用することが必要である。また、衛星 SAR

の観測データや、航空レーザ測量データを処理した標高データなどの一部を除いてはアーカイブデータが希少であるため、データの利用に高いコストがかかる。さらに、SAR で観測されたデータは、空中写真とは異なる特有の歪みがあるため、処理に特別の知識・技能を要し、扱いが難しい。しかし、レーザは植生があっても地表まで照射波を届かせることがほぼ可能で、レーダーは積雲・噴煙・植生の影響を受けづらい。これらは空中写真や受動型センサにはない、非常に大きなメリットである。また、レーザについて、一部の照射波が地表に届かず植生で反射することを応用すれば、本研究での成果のように、樹高・樹木本数などのパラメータも得られる。さらに、SAR で観測したデータを用いて干渉処理を行えば、数 cm 以下の精度で地形変化が把握できる。加えて、衛星 SAR や MMS を用いれば、それぞれ広域、長距離の観測により広範囲のデータが得られる。ただし以前は、レーザ点群のデータ量が膨大となるため（例えば、本研究で扱った数 km 四方の範囲ではギガバイト単位になる）、解析はごく狭い範囲に限られた。しかし、近年ではコンピュータ技術の発展により、より広範囲の点群データの利用が可能となってきている。

以上のように地形の把握や解析では、現在でも空中写真の利用に有利な点があるが、表 4.1.2 の赤字で示したような、空中写真が使えない場合や空中写真の利用よりも高い精度を求める場合には、受動型センサや能動型センサの利用が必要である。特に、災害への対応を行う際には、斜面災害の原因となる豪雨をもたらす積雲、火山噴火に伴う噴煙、植生の存在等が、空中写真や光学センサを用いて地形の把握を行う際の遮蔽物になりやすい。このため、能動型センサの利用が適切である。

他方、地形の把握や解析を適切に行うためには、事象に合った観測と計測を行う必要がある。事象は一定の広がりを持つため、これをカバーするスケールを決める必要がある。また、地形に関する情報は空間的に高密度で、かつ高精度であるのが理想的だが、これらを同時に満たすことは極めて困難である。例えば衛星リモートセンシングでは、衛星の軌道やセンサの性能や、衛星と地上局との通信容量などの制約により、一度に観測できる空間範囲と空間分解能がトレードオフの関係になり、波長、データ密度、取得範囲、データの取り扱いやすさ等の全てを満足させる単一のデータは存在しない（島崎, 2005）。航空機や地上からのリモートセンシングでは、スケールは更に制限される。DEM などの高さ精度は、元のデータの空間分解能に左右されるため、これについても広域性と高精度を同時に満たすことは困難である。

また、スケールには空間スケールに加えて時間スケールの観点もある。例えば、早川・小口 (2016) は、時空間のスケールの観点から各種観測手法の整理を行っている。地上レーザは、三脚を据え続けることで同一個所を連続的に観測が可能であるため、機器の用意などの環境が整えば、極めて短い周期で観測ができる。他方、航空レーザや航空機 SAR、MMS は、観測のたびにセンサを移動させる必要があるためコストがかかり、頻繁には観測できない。衛星 SAR は、現在比較的 low コストでデータが利用できる ALOS-2/PALSAR-2 について、災害発生後約 2~3 日で干渉機会が得られるため、観測頻度的には中間的といえる。観測頻度の観点は、地すべりなど継続的に移動を把握する必要がある事象に対して、特に重要である。

他方、災害をもたらす自然事象に伴う地形変化を把握する場合には、災害発生前との比較が必要となる。この点で、アーカイブデータの存在が重要である。衛星 SAR や航空レーザには、多くのアーカイブデータが存在する。しかし、航空機 SAR や MMS などの場合は、災害発生前のデータの存在が稀である。また、地上レーザは現に観測を行っている地すべりなどの地形変化は把握できるが、崩壊を起こしてしまった斜面の地形変化量の復元は、崩壊前のデータが存在しない限り困難である。よって、観測頻度とアーカイブの存在の観点から時間スケールを整理することが必要である。

以上を踏まえて、センサを整理する上で重要な視点を以下の 4 点に整理した。

「空間スケール」…どの程度の範囲の地形モデル等が作成できるか、地形変化が分かるか

「時間スケール」…どの程度の観測頻度を有し機動性を有するか、過去のデータとの対比により地形変化が分かるか

「空間分解能」…どの程度の空間的密度で地形モデル等が作成できるか、地形変化が分かるか

「高さ精度」…どの程度の高さ精度で地形モデル等が作成できるか、地形変化が分かるか

この整理を踏まえ、センサごとの特性を表 4.1.3 にまとめた。以下、この内容について、より具体的に述べる。

4. 1. 1 レーダー

災害及び関連する環境に関する自然事象の把握・解析に適切なマイクロ波センサについて、本研究成果を踏まえて、衛星 SAR と航空機 SAR の例を提示する。SAR は共通して、観測データを画像化したときの地物の視認性は低いが、積雲などの遮蔽物に強い。また、干渉 SAR には、他の手法と比較して極めて高い精度の地形変化を把握できる利点がある。

衛星 SAR で扱える空間スケールは、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の後に国土地理院（2016a）が実施した ALOS/PALSAR を用いた干渉 SAR の処理範囲が数百 km 四方にわたるなど、上限が大きい。衛星 SAR では ALOS/PALSAR など多くのアーカイブがあり、現在運用されている ALOS-2/PALSAR-2 についても、干渉処理を可能とするためのアーカイブが多数存在する。しかし、回帰周期が初号機より短縮された ALOS-2 の場合でも、干渉処理が可能となる観測の実施まで災害発生後 2～3 日かかる（宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター、2016）。この状況を踏まえて観測頻度は数日に 1 回と判断した。空間分解能は、本研究で扱った 10 m 程度のもののほか、現在は 1 m 程度のものもある。高さ精度は、干渉 SAR では本研究の「地すべりの解析」のように数 cm の地形変化が分かり、DEM の作成でも本研究の事例や SRTM のように、数十 m の精度が実現している。DEM の作成手法には、本研究で提示したようにステレオマッチング的手法と干渉処理がある。前者による DEM の精度は 8 m 分解能の RADARSAT-1 データに対して 40 m 程度であったのに対し、後者による DEM の精度は 10 m 分解能の ALOS/PALSAR データに対して 17 m（宇宙航空研究開発機構宇宙利用ミッション本部、2012）であった。このため、干渉処理が手法的に優位といえる。表には Terra SAR-X（DLR、2014）や RADARSAT-2（Canadian Space Agency、2011）による高分解能化なども加味した。

また、衛星 SAR を用いた地形変化の把握では、2 時期の強度画像の変化をマッチング的に処理する手法が飛田ほか (1999) などによって示されている。この手法では、アジマス及びレンジ方向への移動が 1/10 ピクセル以下のレベルで検出可能であり、衛星 SAR の北行・南行軌道観測データの 2 組の処理結果を組み合わせることで、3 次元の地形変化が得られる (飛田ほか, 2001)。津波に伴う地形変化など、地表状態が激変する場合には単純な画像相関は使えないが、建物など災害前後で残存するものに限定すれば、変化の把握が可能である (リュウほか, 2014)。この手法で得られる高さの精度は、衛星 SAR の分解能の 1/10 程度の数十 cm 以下とみなされる。これよりも干渉 SAR のほうが精度が高いため、表 4.1.3 などには含めなかったが、火山噴火や地震に伴う地形変化の把握につながると考え、以下必要に応じて言及する。

他方、航空機 SAR で扱うスケールは、本研究での範囲が数 km 四方であり、情報通信研究機構 (2014) において示されている Pi-SAR2 の諸元でも観測幅が 5~10 km 以下であるため、10 km 以内とした。航空機 SAR はコストの問題から頻繁な観測は難しく、アーカイブが少ないため、地形変化の把握も困難である。空間分解能は本研究で用いた GSI-SAR や Pi-SAR2 などを踏まえて整理した。高さ精度は、本研究成果や大木ほか (2005) を踏まえ数 m~10 m とした。

4. 1. 2 レーザ

災害及び関連する環境に関する自然事象の把握・解析に適切なレーザセンサについて、本研究を踏まえて航空レーザ、MMS、地上レーザについて提示する。レーザは、総じて観測データを画像化したときの地物の視認性は低いが、植生下の地形の把握への適用がほぼ可能であり、高い精度で高さに関する情報が得られる。

航空レーザを用いて樹高や樹木密度などの植生状態に関する指標を得ようとするれば、点群データを扱う必要がある。点群データの処理では、本研究が対象とした数 km 四方でもデータ量がギガバイト単位となった。これとコンピュータの処理能力を考慮すると、スケールは数 km が限界である。ただし、国土地理院の標高データなど、既存の DEM のみを扱う場合にはデータ量が大幅に減るため、全国規模 (~1000 km 四方) を扱うことも可能とした。また、コストの問題から頻繁な観測は難しい。しかし、アーカイブは広く存在するため、新たにデータを取得すれば 2 時期のデータの比較により地形変化を得ることが可能である。空間分解能は、本研究で扱った 2 mDEM の作成に用いたデータの点群密度が 3 点/m²であったことなどを踏まえ、数十 cm~1 m 四方程度に 1 点とした。DEM の高さ精度は、これまで述べてきた 15 cm 程度を用いた。地形変化の把握の際には、2 時期の比較となり高さ精度はやや下がるため、20 cm 程度とした。

MMS の応用例では、例えば山野 (2000) が道路データの取得を対象として数百 m~数 km 四方のスケールを扱っている。しかし、本研究のように、データ取得が連続的である必要がない場合もあるため、数百 km の観測データ処理も可能とした。MMS は機動性が高く、災害発生直後の観測が可能だが、地すべりのモニタリングのようなケースでは、据え付けで連続観測ができる地上レーザなどのほうが適切である。移動しながらの観測を想定すると、対象は必然的に広範囲になる。ただし、観測にはコストがかかるため、頻度は数日に 1 回程度と整理した。また、現時

点では航空レーザ等と比較してアーカイブの範囲がごく狭いため、過去との対比も困難である。空間分解能は、アジア航測株式会社のレーザ計測型 MMS の Geo Master NEO®が、約 1000 点 /1 m² の点群密度で計測可能であることを踏まえ、1 点あたりの広さを数 cm~1 m 四方とした。高さデータの精度は、Geo Master NEO®では GNSS の観測条件が良好だった場合に 5 cm 以内としている。しかし、津波の痕跡などの認定は、点群データを同時撮影したビデオカメラ画像の情報で着色しても、それほど容易ではない。すなわち、レーザ計測型 MMS を用いた地物の認定は、ビデオカメラ撮影型 MMS と同程度以上の困難さがあると考えた。よって、高さ精度は本研究におけるビデオカメラ撮影型 MMS の成果（多くの地点で較差 20 cm 以内）を踏まえて数十 cm とした。

地上レーザでは、本研究でも数百 m 四方の範囲に複数回の計測を要するなど他のセンサと比較して適用範囲が狭い。早川・小口（2016）において示されたように、スケールを数 km に拡げることにも可能だが、高精度で微小な地形変化を得られる地上レーザのメリットは、スケールを拡げると低下するため、表ではやや狭くした。据え付け等による連続的観測で、地すべりなどの地形変化の把握も精度よく実施できる。しかし、コストの問題などからアーカイブは希少であり、災害発生前から観測が行われていなければ、災害発生前後の地形変化量の把握は困難である。他方、空間分解能や高さ精度は非常に高く、本研究で用いた地上レーザ（GLS-1500）では、数百 m 先の観測対象でデータ密度が数 cm 四方に 1 点、高さ精度は数 cm 程度となるため（株式会社トプコン、2013）、これを踏まえて表を整理した。地形変化の把握では、2 時期の比較となり高さの精度がやや下がるため数 cm~10 cm とした。

ここまでで述べたように、能動型センサを用いて観測されたデータによるプロダクトは多様なスケールに対応しており、それぞれに対応する分解能、精度があるといえる。以下では、把握・解析対象となる自然事象の観点から、能動型センサの応用について整理する。

(4.1 図表集)

表 4.1.1 本稿で扱った研究の一覧

	対象災害 (想定含む)	観測手法	処理プロダクト等	データ分解能	データ属性	解析スケール
レーダー ①	火山噴火 など	干渉SAR(衛星)	DEM (ステレオマッチング)	8 m(水平方向) (RADARSAT)	面(Grid)	数km四方
レーダー ①	地震など	干渉SAR	地球地図 (SRTM-DEM)	0.5 km(水平方向) (地球地図のデータ密度)	面(Grid)	全球
レーダー ②	火山噴火 など	SAR(航空機)	DEM	1.5 m(水平方向) (GSI-SAR)	面(Grid)	数km四方
レーダー ③	地すべり	干渉SAR(衛星) 航空レーザ	SAR干渉画像 地形分類図	10 m(水平方向) (ALOS/SAR) 2点/m ² (点群密度) (LIDAR)	面(Grid) 点(点群)	数km四方
レーザ ①	地震(地表 地震断層)	地上レーザ	DEM (レーザ点群)	数cm(高さ方向)	点(点群)	数百m四方
レーザ ②	津波(浸水深)	MMS 航空レーザ	高さデータ (浸水深・浸水深高)	5~10 cm (高さ方向) (計測単位)	点 (離散的)	数百km(延長)
レーザ ③	斜面崩壊 (豪雨)	航空レーザ	DEM, DSM	3点/m ² (点群密度) (LIDAR)	点(点群)	数km四方

※下線付き太字で示したものは、複数のセンサを組み合わせたもの

表 4.1.2 観測手法ごとのメリット・デメリット

手法	メリット	デメリット
現地調査	あらゆる観測対象の情報を詳細に取得可能(調査対象へのアプローチが可能な場合)	対象が広域、詳細になるほど実施困難
空中写真	調査対象の視認が容易 アーカイブを使えば情報の取得が安価 DEMの作成やDEMの差分から地形変化を把握することも可能 → 地形の把握・解析の基本データ	遮蔽物(積雲・噴煙・植生)の下の地形の情報は取得不可 DEMの精度が地すべりの監視等には不足 国・地域レベルなどの広域の把握には不適

手法	コスト※	視認性	遮蔽物の透過性	DEMの精度※	地形変化の把握の精度※	その他
受動型センサ (光学センサ)	△ (高分解能は×)	○	×	△ (高分解能は○)	×	広域の把握に向く 空中写真がない箇所での地形の把握は○
能動型センサ (レーダー)	×	×	◎ (積雲、噴煙、植生の影響を受けづらい)	×	◎ (高精度で取得可)	データが特有の歪みを持つため扱いづらい面有
能動型センサ (レーザ)	×	×	○ (植生下の地形が取得可能)	◎ (植生下もほぼ可)	◎ (植生下もほぼ可)	植生を透過しなかったデータの解析で、樹木形状の情報が取得可能

※は空中写真と比べた場合の優劣。スケールについてはセンサの分解能に依存するが、低分解能センサの利用やMMSによる長距離の観測で広範囲の情報取得が可能

表 4.1.3 センサの空間スケール、分解能、高さ精度

センサ	空間スケール	時間スケール (観測頻度) (アーカイブ)		空間分解能	高さ精度
衛星SAR	数百m～数百km (SRTMは全球)	数日/回	○	1 m～数十m	DEM...数m～数十m (マッチングより干渉が優位) 地形変化...1 cm～10 cm
航空機SAR	数百m～10 km	数か月 ～数年/ 回 ^(※)	×	数十cm～数m	DEM...数m～10 m
航空レーザ	数百m～数km (DEMは全国規模)	数か月 ～数年/ 回	○	数十cm～1 m四方 程度 (点群1点あたりの広さ) 数m～数百m (DEM)	DEM...15 cm程度 地形変化...20 cm程度
MMS	数百m～数km (分散データなら ～数百km)	数日～ 数年/回 (※)	×	数cm～1 m四方 (点群1点あたりの広さ)	高さデータ...数十cm (画像上で対象を同定する場 合)
地上レーザ	数十m～数百m	連続的	×	数mm～数cm四方 (点群1点あたりの広さ)	DEM...数cm 地形変化...数cm～10 cm

※...コスト面から繰り返し観測は難しい場合が多いが、災害発生後等における迅速な観測(即日観測等)は可能。

4. 2 自然事象別にみた能動型センサの応用

本研究での成果を対象となる自然事象、およびセンサ、分解能、スケール等の面から整理すると表 4.2.1 のとおりとなる。本研究では災害及び関連する環境に関する自然事象として、「火山噴火」「地震」「津波」「地すべり」「斜面崩壊」を取り上げた。地形の解析に関する「衛星 SAR による地すべりの解析」「航空レーザによる森林の形状と斜面安定性の解析」の両研究では、センサやプロダクトの組合せにより発展的な成果を得た。地すべりの解析の研究では、航空レーザ測量データを用いた地形分類図と SAR 干渉画像の組合せにより地すべりの様子を明らかにし、森林の形状と斜面安定性の解析の研究では、DTM から得られる地形指標（傾斜量）と元の点群データの処理から得られた森林 3 次元指標（標高）から斜面安定性の評価を高精度化した。

空中写真や受動型センサ、現地観測などで得られる成果は、適用範囲の空間スケールが狭かったり、面的でなかったりする場合が多い。例えば、地すべりの監視のための移動杭観測では杭のある点のデータしか得られない。また、空中写真は詳細な地形の把握ができるが、1 枚の写真がカバーできる範囲が数 km 四方に限られ、植生などがある箇所の地形を把握するのも難しい。

レーダーやレーザの適用は、これらの課題を一定程度解決したとみなされる。干渉 SAR の適用は、地震などによる広域の地形変化を面的に把握可能とし、レーザの適用は、植生がある場所を含めた広域の地形モデル作成を可能とした。しかし、把握された地形モデルや地形変化と現地の地表状態との関連や、災害などの事象への寄与因子の検討などは不十分な場合が多かった。例えば、干渉 SAR により地すべりに伴う地形変化の場所を把握できるが、なぜその場所の地形が変化するかは説明できない。また、地形変化の範囲の検討では、地すべりブロックの分布の影響を受けるため、地形分類が必要である。このように、災害に関連した自然事象の解明には、干渉 SAR に加えて現地の地表状態に関連した面的な情報を把握する手法が必要である。他方、斜面の安定性には、地形、植生などの様々な要素が影響している。地形と植生はともに、レーザデータの解析でその特徴を明らかにできるが、これまでの研究では、地形を扱う場合には傾斜量や凹凸度など専ら地形に注目していた場合が多く、植生の災害発生への寄与の検討は不十分であった。

本研究で示した、地すべりの解析および森林の形状と斜面安定性の解析の事例では、センサやプロダクトを複合的に組み合わせることで、干渉 SAR による成果と現地の地表状態との結びつけや、斜面安定性に関する多面的な寄与因子の推定を可能とした。能動型センサを利用しながら他の能動型センサの成果を参照する研究には、衛星 SAR の強度画像マッチングによる地形変化解析結果をレーザ高度計による地形変化傾向と比較した飛田ほか (2001) などがある。しかし既存研究の多くは、センサやプロダクトを組み合わせる新たな成果を得るというよりは、特定の手法による成果を他の成果で検証することを目的としていた。他方、航空レーザ測量データの解析により地形と植生の関係を調べる研究には、平田 (2005b) や小荒井ほか (2009) などがあるが、大半は地形の把握・解析の観点ではなく植生の観点のみから行われている。

能動型センサによる観測データを組み合わせると、コストや手間が増大する。例え

ば、SAR とレーザを組み合わせるには、それぞれのデータを取得するためのコストと、データを処理するための知識・技術、さらには大量のデータを処理できるコンピュータ等が必要である。このため、能動型センサやそのプロダクトを複合的に扱う研究は、従前は試みるのが困難であった。一方、本研究では、近年の能動型センサを用いたデータ取得機会の増加や、コンピュータ技術の進展などが可能とした、センサやプロダクトを組み合わせた「複合的な地形把握・解析手法」の意義を提示した（図 4.2.1）。

以下では、本研究で取り上げた「火山噴火」「地震」「津波」「地すべり」「斜面崩壊」の5つの災害及び関連する環境に関する自然事象について、能動型センサを取り上げた際のスケール、分解能、高さ精度について、より詳しく述べる。その上で、適用可能性を踏まえつつ、能動型センサの応用の発展について検討する。

事象のスケールに関する検討では、先に述べたセンサ各論での整理を踏まえて、「空間スケール」「時間スケール」「空間分解能」「高さ精度」の4つの観点から整理を行った（表 4.2.2）。また、適用可能なセンサの検討では、空間スケールと高さ精度の観点を重視した（図 4.2.2）。これは、センサや事象に関する特性のうち、空間スケールと空間分解能はトレードオフの関係にあり、アーカイブの必要性などについては、把握・解析すべき対象が地形そのものか地形変化かに強く影響されるため、センサの適用の可否は前記の2つの精度に左右されると判断したためである。ただし、地上レーザや航空レーザを用いた地形変化の把握の高さ精度は、これらのセンサを用いて作成した DEM 自体の高さ精度と大きくは変わらないため、DEM の作成と地形変化の把握を一つの矩形にまとめた。また、一部の事象については近年他にも複合的手法を用いた研究が行われはじめたことを踏まえ、研究のレビューも行いつつ検討する。

4. 2. 1 火山噴火

火山活動に伴う地形およびその変化の把握と解析の対象として、活動に伴う山体変形や、激しい噴火に伴う火口周辺的大幅な地形変化が挙げられる。これらの例で想定されるスケールについて、以下のとおり整理した（表 4.2.2）。

山体変形については、できるだけ微小な地形変化を捉えることを想定した。ここでは、JERS-1/SAR を国後島の爺爺岳に適用し山体収縮を検出した矢来（2007）などの事例を踏まえ、同じ L バンドセンサを用いた ALOS/PALSAR などによる干渉 SAR をベースとして、必要な分解能等を表にまとめた。空間スケールは数 km 四方程度までを想定した。平常状態である過去との対比が必須のため、アーカイブデータは不可欠であり、地形変化も継続的に観測する必要がある。

火口周辺の地形変化に関する研究では、地形変化が大規模になることを想定した。数 m の DEM の誤差が問題にならないような大規模な変化が発生した場合の地形の把握には、航空機 SAR などが利用できる。航空機 SAR を用いた大木ほか（2005）や下野ほか（2011）は、数百 m 四方の火口を分解能 1 m 程度、高さ精度 5 m 程度で計測したため、空間スケールや分解能、高さ精度はこれらの値以上が求められるとした。また、噴煙の存在の有無がセンサの選択では重要である。アーカイブデータはあったほうが望ましいが、山体変形の場合ほどの高さ精度は要し

ない。したがって、噴火前の空中写真から作成した DEM など、対比のための地形モデルは能動型センサ以外でも作成可能であるため、能動型センサの過去の観測データは必須でないとした。しかし、地形変化の把握は能動型センサでないとなりに難しいため、繰り返し観測は必要とした。

以上を踏まえた空間スケール・分解能・高さ精度とセンサとの対応を図 4.2.3 に示した。火山活動に伴う山体の地形変化は、時系列的な干渉 SAR 解析で把握でき、海外では ENVISAT などを用いて地形変化を検出した例が示されており (Samsonov and d'Oreye, 2012; Henderson and Pritchard, 2013 など)、国内では ALOS/PALSAR や ALOS-2/PALSAR-2 などを用いた例が示されている (宮城ほか, 2013; 小林, 2015 など)。マグマ溜まりの膨張・収縮などを扱ったこれらの研究で検出された地形変化の規模は、多くが数 cm 程度であるため、空中写真や航空レーザでは高さ精度が不足し適当でない。他方、地上レーザを用いた DEM の高さ精度は数百 m の範囲について数 cm である。火山活動の影響を受けない安全な場所からの観測を想定すると、計測距離の拡大によりさらに精度が下がるため、干渉 SAR による精度には及ばないが、連続的に観測を行えば火山活動に伴う地形変化を捉えられる可能性がある。現状では、2011 年に噴火した新燃岳周辺の地形変化把握への試みを紹介した中島 (2012) を除き、地上レーザを用いた研究事例はほとんどないが、SAR 干渉画像でみられた地形変化の検証などに適用可能と考える。

他方、激しい噴火活動時における火口内などの大規模な地形変化の把握については、航空機 SAR や航空レーザなどの利用が考えられる。空中写真や光学センサでは、噴煙の存在等により地形モデルの作成は難しい。また、地上レーザや MMS でも、噴火活動中の火口近傍での観測は困難と考える。さらに、干渉 SAR の適用には、干渉させる 2 つのデータの観測時期の地表状態が類似し、地形変化の絶対値がある程度小さい (数十 cm 以下) ことが求められる。よって、2 つのデータがほぼ同時に取得されないと干渉は困難である。衛星 SAR では、この同時取得がこれまで困難だったため (浦塚, 2015)、変化が激しい火口内の地形の把握には向かなかった。しかし、2007 年に打ち上げられた TerraSAR-X と同時観測を行い、DEM を作成することを意図した TanDEM-X が 2010 年に打ち上げられた (野中ほか, 2016)。現状ではまだ研究事例は少なく、2 つのデータの同時観測が可能な航空機 SAR のほうが実績があるが、今後の研究成果の蓄積とともに衛星 SAR の適用可能性が高まると考える。

また、2000 年の有珠山の噴火時のように、地表状態をある程度保ったまま大きく隆起するような現象が見られる場合には、干渉 SAR で捉えるには地形変化が大きすぎるが、衛星 SAR を用いた観測データのマッチング的手法などによる地形変化の把握は可能である (飛田ほか, 2001)。噴火活動が活発だと航空機は近づけないので、航空レーザ測量による地形変化の把握は困難だが、衛星 SAR を用いた観測は可能である。他方、地表状態が類似した SAR 強度画像を得ようとするれば、観測周期は干渉 SAR が適用できる条件と同様になるため、衛星 SAR の観測データの処理により地形変化の情報が数日おきに得られる。航空レーザは随時観測が可能のため、衛星 SAR と航空レーザを組み合わせることで、高い時間分解能で山体の地形変化を把握できると考える。噴火前の地形についても、衛星 SAR のアーカイブデータが多数あることに加え、航空レーザも伊豆大島火山などのデータが存在するように (国土地理院, 2007)、対

比可能なケースが多くみられる。このことは、衛星 SAR と航空レーザの組合せで、地形変化を精度良く復元できる可能性を示し、火山成長の新たなモデル構築につながることを示す。

これらの議論を踏まえて、複合的把握・解析手法による火山研究の今後の可能性について、表 4.2.3 にまとめた。山体の地形の把握については、数 cm 程度の微小な変化であれば衛星 SAR による干渉 SAR、数 m に及び大きな変化であれば衛星 SAR の強度画像マッチング、火口内など地表状態の激変を伴う地形変化であれば航空機 SAR 測量などが従来用いられてきた。本研究では、火口内を含む火口周辺の劇的な地形変化を想定した地形の把握に関連して、航空機 SAR・衛星 SAR を用いた成果を示した。既存手法に相当する表 4.2.3 の単一能動型センサによる手法等の部分では、本研究で示した 2 つの手法について、マッチング的な手法よりも高精度となる干渉 SAR を記した。ただし本研究では複合的な把握・解析手法は特に例示せず、従来他の研究でもセンサの複合的利用は成果検証の程度であったといえる。しかし、新たな可能性として、数 m に及ぶ大きな火口周辺地形の大規模変化について、衛星 SAR の強度画像マッチングと航空レーザ測量データを用いた差分処理を組み合わせることで、数十 cm 程度の高さ精度で高頻度に時系列把握ができると推定される。このような手法を用いて、有珠山で見られたような山体膨張などについて、その過程を時間的に細かく把握すれば、火山活動のメカニズムの解明に貢献できると考える。

4. 2. 2 地震

地震に伴う地形およびその変化の把握・解析対象として、地震に伴い地表に出現した地震断層や、広域の干渉 SAR など確認される広域の地形変化などが挙げられる。これらの分析で想定されるスケール等について、以下のとおり整理した（表 4.2.2）。

地震断層の研究では、例えば吉見ほか（2008）が平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震において、およそ 20 km にわたり地表地震断層が出現したと述べている。本研究で扱った範囲は数百 m 程度だが、これより大きなスケールのものも対象となるため、表では数十 km 以下とした。断層周辺の変位は、地震発生後の一時期の観測で得られるため、アーカイブ等は必須でないとした。空間分解能と高さ精度は、地表地震断層の把握には地上レーザのほか航空レーザなども活用されていることを踏まえ（高ほか, 2011 など）、それぞれ 1 m 以下、数十 cm 以下とした。

広域の地形変化については、例えば平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震が東日本の広範囲に大規模な地殻変動をもたらしたことが分かっている。この種の地形変化のスケールは数百 km に及ぶ。地形変化の把握には、過去との対比を行うためのアーカイブデータが必要である。空間分解能は、広域の地形変化把握に衛星 SAR を用いた干渉 SAR が活用されていることを踏まえ数十 m で十分とした。高さ精度は高いほど良いが、地表地震断層の把握と合わせ、数十 cm 以下とした。

これらを踏まえて、空間スケール・分解能・高さ精度とセンサとの対応を図 4.2.4 に示した。地震に伴う広域の地形変化は干渉 SAR の適用により面的に捉えられる。地震に伴う地形変化を正確に捉えるには、水平・鉛直それぞれの変化量を精度よく把握する必要がある。

地形変化を把握する上で最も精度が良い手法は干渉 SAR だが、干渉 SAR ではセンサと地物との距離変化しか分からない。このため、地形変化の解析の高度化を目的として、北行・南行軌道の2組の干渉処理結果を組み合わせて、変化を成分に分ける手法がとられている(2.5次元解析; 国土地理院, 2016e など)。ただしこれで得られるのは東西成分と上下成分に近い2成分(準東西成分、準上下成分)のみであり、南北成分は主に準上下成分に混ざって検出されるため分離できない。一方、地上レーザでは数 cm の高さ精度で地表地震断層の変位を計測できるため、干渉 SAR による処理結果との組合せにより、高い精度を保ちつつ断層付近での地形変化を東西・南北・上下の3成分に分離できると考える。

また、もう少し粗い精度での把握で構わなければ、衛星 SAR の強度画像を用いたマッチングによる手法も利用できる。数十 cm の精度で、東西・南北・上下方向の地形変化データが得られるため、広域の地形変化の把握が可能となる。地表地震断層については、航空レーザで取得した地震発生前後のレーザ点群データの分布状態の変化から3次元移動量を示した Nissen et al. (2012) や、地震発生前後のレーザデータと画像データの組合せで水平・鉛直方向の変位量を示した品川ほか(2013)などの成果がある。また、図 4.2.4 では MMS の適用範囲が、地表地震断層の把握の範囲と重なっている。しかし、本研究で扱ったような車載型のシステムでは、道路から観測可能な場合に限定されるため、MMS が適用できる場面は、断層が長距離にわたり連続的に水田上に露出するケースなどに限られる。

さらに、地表がよく見えるような場合には、汎用的なデジタルカメラなどを用いた近接写真測量も有用である。近年は UAV (Unmanned Aerial Vehicle) が安価になってきており、SfM (Structure from Motion) 技術を用いて、大量の写真から詳細な断層地形を把握するような研究も行われている(内山, 2014b など)。これらの手法は、地上レーザを用いた場合などと比較してコスト面で有利な場合が多いため、条件に応じて選択することができる。

2011年4月の福島県浜通りの地震では、干渉 SAR と地上レーザ、および航空レーザを利用した成果が得られており、SAR 干渉画像から推定される地表地震断層の位置と、地上レーザなどによる成果がよく一致している。2016年の熊本地震でも、干渉 SAR を用いた解析結果は地震に伴う面的な地形変化を適切に示し、地震前後の航空レーザ測量データの処理結果は断層周辺の鉛直方向の地形変化を正確に再現した(国土地理院, 2016f)。この研究が示した地形変化の傾向は、断層を境に明瞭に異なっており、SAR 干渉画像で見られる地形変化も断層の北側の沈下傾向を示している。しかし、SAR とレーザの両方の成果を取り上げた研究は、レーザを主体とする研究で見られるものの、Wilkinson et al. (2010) や Nissen et al. (2012) など、その多くにおいて SAR の記述は参照程度である。活断層の抽出については、Meigs (2013) が SRTM による DEM と航空レーザによる DEM を比較しており、SAR を用いて得た DEM も示しているが、やはり扱いは参照程度にとどまっている。

これらを踏まえて、複合的把握・解析手法による地震の研究の今後の可能性について、表 4.2.3 に示した。従前は、広域の地形変化の把握については衛星 SAR の観測データを用いた干渉 SAR が多く用いられてきた。地表地震断層の把握では、本研究も含め航空レーザや地上レーザなどの

レーザが用いられてきた。一方、複合的な把握・解析手法については本研究でも例示せず、他の事例もほとんどない。しかし、地上レーザ・航空レーザを用いた結果と干渉 SAR の処理結果が整合的であることは、面的だがセンサと地物との距離変化しか分からない干渉 SAR と、線的だが地形変化の上下成分が正確に把握可能なレーザ計測との組合せにより、地震に伴う地形変化が詳細かつ正確に、かつ広域で得られる新たな可能性を示している。例えば、高さ精度がともに数 cm となる干渉 SAR による処理結果と地上レーザによる計測を組み合わせることで、干渉 SAR 単独では困難な地形変化の東西・南北・上下成分への分離が高精度で可能となると考える。さらに衛星 SAR の強度画像のマッチングや空中写真などの画像データの処理などの別手法とあわせ、断層近傍などの地形変化を詳細に把握することで、地震に伴う地形変化の全体像の解明につながると期待される。

4. 2. 3 津波

津波に伴う地形変化や津波の浸水深・浸水高について、解析で想定されるスケール等について、以下のとおり整理した（表 4.2.2）。

津波による地形変化の把握の対象には、海岸平野における津波堆積物の堆積や、岩石海岸の海に面した斜面の侵食などがある（早川ほか, 2015）。津波堆積物の堆積を扱った研究（佐藤ほか, 1994、高井ほか, 2013 など）によると、堆積物の厚さは 1993 年北海道南西沖地震の例では 10 cm を超える分布は特定の場所のみであり、2011 年東北地方太平洋沖地震の例でも 20 cm を超える場所は限定的である。このように堆積厚の大半が 20 cm 以下であると、空中写真や航空レーザの差分では抽出が精度的に難しく、手法は地上レーザや現地調査などに限定される。斜面の侵食を扱った研究についても、例えば早川ほか（2015）が、津波に伴う侵食による微細な地形特徴の抽出は、空中写真や航空レーザでは精度が不足すると述べており、地上レーザの利用が適当である。これらを踏まえて高さ精度は数 cm 以下とし、空間スケールと空間分解能は、地上レーザの利用を想定して、それぞれ数百 m 以下、数 cm 四方に 1 点以下とした。地形変化の把握は、津波の発生後のみのデータに基づく痕跡の分析でもある程度は推定可能だが、定量的な把握にはアーカイブデータとの対比が必要である。

他方、津波の浸水深・浸水高は、建物等にみられる痕跡を計測することで把握可能だが、上空からの観測で痕跡を測るのは困難なため、空中写真や人工衛星・航空機搭載センサは原則として使えない。浸水深の把握の空間スケールは、東北地方太平洋沖地震に伴う被害範囲が三陸北部から房総半島にかけての広い範囲であったため、これに相当する数百 km を上限とし、大船渡湾や気仙沼港などの個々の港湾のスケールに対応した数 km を下限とした。津波の痕跡の高さの計測については、災害発生直後のデータがあれば十分なため、アーカイブの存在は考慮しない。空間分解能（データ密度）については、建物などにみられる痕跡が計測できればよいため、10 m 四方に 1 箇所を下限とし、上限は本研究における取得密度（仙台平野～三陸北部：延長約 150 km に対して計測数 551 箇所）を踏まえて 1 km 四方に 1 箇所とした。高さ精度については、本研究の成果を踏まえ 1 m 以下とした。

これらを踏まえた空間スケール・分解能・高さ精度とセンサとの対応を図 4.2.5 に示した。津波に伴う地形変化は、先に述べたように微細な地形の特徴の抽出を行おうとすれば数 cm 以下の高い精度が求められる。しかし、干渉 SAR による解析は高さ精度は満たすものの、災害前後で地表状態の変化が大きいため、適用は困難である。よって、本研究で扱ったセンサの中では地上レーザの利用が適切である。早川・小口 (2015) が述べているように、三陸海岸など繰り返し津波被害にあっている場所でアーカイブデータを得ておくことが、定量的な地形変化の把握に必要と考える。現状では、アーカイブは希少だが、事例の蓄積により、時系列的な解析ができる機会が今後発生するであろう。

他方、津波の浸水深・浸水高については、津波の痕跡と地面との比高として現地で観測される値は浸水深であり、浸水高を算出するには航空レーザによる標高データなど他のデータとの組合せが必要である。津波の痕跡は、上空から直下を撮影した空中写真にはほとんど写らないため、地上に近いところから観測を行う必要がある。しかし、地上レーザを用いた観測のように三脚を据えて計測を行うような手法では、広域に大量のデータ取得を行うことは無理である。よって、本研究のように、広域のビデオ撮影又はレーザ計測を行える MMS の適用が妥当である。また、津波の最大到達域は空中写真の判読等で推定することも可能であり（例えば、東北地方太平洋沖地震について浸水域を示した国土地理院, 2011c）、境界部では標高データから浸水高（= 遡上高）を導出することが可能である。例えば、得られた津波の浸水高の分布と航空レーザ測量データによる詳細な地形分類を組み合わせることで、小荒井ほか (2015) が示したような、内陸部への津波の侵入に対する堤防や砂州・砂堆等の効果の検証につながると考える。本研究の成果についても、MMS と航空レーザの組合せであるが、地形分類の実施など航空レーザ測量データの解析をさらに進めることで、より発展するであろう。

以上を踏まえて、複合的把握・解析手法による津波の研究の成果と今後の可能性について表 4.2.3 にまとめた。津波に伴う地形変化の把握の対象は、MMS の利用などの新しい手法を考えない場合には、現地調査による浸水深の把握などが中心であった。また、劇的な地形変化を把握する手法は、災害前後の航空レーザの差分処理などが想定される程度であった。しかし、東北地方太平洋沖地震などを契機として、本研究で扱ったような MMS を津波の浸水深の把握に適用した例や、地上レーザを津波発生後の詳細な地形の把握に適用した例がみられるようになった。

複合的把握・解析手法については、本研究では MMS を用いた計測結果と航空レーザ測量による標高データの組合せにより、広域の津波の浸水高の把握を行った。これは高さデータの単純な足し算を用いているため、単独手法からの発展度は小さいが、比較的短期間の観測で、大量の現地調査の成果に匹敵する津波の浸水高の分布の把握を可能とした。現状では、津波に伴う浸水の状況を MMS を用いた計測で明らかにした研究は、本研究以外にはほとんどない。しかし、MMS と航空レーザの組合せは、津波に対する地形の影響の解明や、津波の浸水シミュレーションの高精度化に貢献すると考える。また、航空レーザ測量データの解析を更に進めて地形分類などに適用することで、津波に関する地形の影響の更なる解明につながると期待される。

4. 2. 4 地すべり

地すべりの解析等で想定されるスケール等について、表 4.2.2 のように整理した。地すべりの空間スケールは個々の地すべり地で大きく異なるため、本研究成果のほか、独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センター（2010）が新潟県旧山古志村（現長岡市）周辺で実施した研究成果なども参考とし、数十 m～数 km 四方とした。時間スケールについては、地形変化解析において大規模な斜面崩壊が起こる前からのモニタリングが重要であるため、時間的な変化が追跡できるアーカイブとの対比や連続観測などの手法が必要とした。また、空間分解能は数十 m 以下とし、高さ精度は移動杭観測で変位が認められる 10 cm 以下とした。さらに、同時に作成する地形分類図は空中写真に近い解像度が求められるため、空間分解能、高さ精度をそれぞれ数十 cm 以下とした。

次に、空間スケール・分解能・高さ精度とセンサとの対応を図 4.2.6 に示した。衛星 SAR も航空レーザも地形モデルの作成に適用できるセンサだが、前者は分解能が低いため詳細な地形モデル作成には向かない反面、地形変化の抽出では数 cm の変位を面的に把握できる。一方、後者は地形変化の把握は不得手だが、レーザの照射密度を上げれば 1 mDEM など詳細な地形モデルを作成できる。本研究は、前者を地すべり地の地形変化の把握に用い、後者を詳細な地形分類図の作成に用いることで、ブロック単位の地すべりの挙動を明らかにした。近年では、佐藤ほか（2012）が同様の試みを行ったほか、奈良間（2015）が ALOS2/PALSAR2 の干渉 SAR 処理結果と航空レーザ測量データの組合せから、地すべりのモニタリングを試みている。

図 4.2.6 を踏まえると、航空レーザの差分データの処理も地形変化の把握に一定の精度の成果をもたらすが、移動杭の観測精度と比較してやや劣るため、干渉 SAR のほうが望ましい。地すべりについては、移動杭の観測結果などから、水平・鉛直方向の地形変化の傾向がある程度細かく把握できるため、センサと地物の間の距離の変化しか分からない干渉 SAR を単独で適用しても、移動ベクトルを推定することは可能である。しかし、ALOS-2/PALSAR-2 などの衛星 SAR では南北方向の地形変化が観測しづらい等の問題があるため、地上レーザを用いて地形変化を把握した研究も多く行われている（Bitelli et al., 2004; Abellan et al., 2006; Teza et al., 2007; Travelletti et al., 2014 など）。また、本研究で扱わなかったセンサとして、地上設置型 SAR を用いた研究も行われている（Leva et al., 2003; Tarchi et al., 2003; Mazzanti et al., 2015 など）。能動型センサを地上に据え付けて観測を行う際には、一定のコストがかかるため、ALOS-2/PALSAR-2 などの比較的安価な手法とどちらを利用すべきかを、地形条件などを考慮して決める必要がある。また、干渉 SAR など得られる面的な地形変化の分布を、点的におさえる移動杭の観測や GNSS による観測が精度を確保する上で重要である。

他方、地形分類図については、既存の図がある場合はその利用がコスト的には有利になる。しかし、過去には活動的でなかった地すべりなど、適切な既存資料がないところでは、樹木の下での地形の把握も可能な航空レーザが有力な手段となる。航空レーザにはアーカイブデータが多いため、それを活用できればコストの点でも空中写真などと比べて有利になる。これらを踏まえると、本研究で用いた干渉 SAR と航空レーザの組合せは、比較的可能性が高い条件下で有利とな

る組合せであり、地すべりの挙動解明につながる発展的な手法を提示したといえる。

図 4.2.6 では地上レーザも地形分類の適用範囲に含まれているが、現状では研究成果はほとんどない。これは、航空レーザでも亀裂や段差の把握は可能であり、地上レーザではデータが詳細ではあるものの、効率が悪くなることが影響していると考えられる。しかし、今後コンピュータ技術の進展等で効率的に分類ができるようになれば、適用例は増えていくと推定される。

以上を踏まえて、複合的把握・解析手法による地すべりの研究の成果について表 4.2.3 に示した。地すべりに伴う地表状態の把握や地形変化の把握では、それぞれ空中写真を利用した地形分類や移動杭などの現地観測が古くから行われていた。その後、2000 年代以降に各種の能動型センサの有用性が示されたため、現在では地形分類に航空レーザによるデータも活用しつつ、地形変化の把握に地上レーザを用いた計測や干渉 SAR の処理結果が利用されている。本研究では、干渉 SAR を適用した地形変化の把握と航空レーザ測量データによる地形分類図の組合せにより、ブロック単位の地すべりの挙動を明らかにした。この複合的手法は、未知の地すべりなどに対して、発生メカニズムの解明等に発展的な貢献をもたらしたとみなされる。近年、筆者が用いた ALOS/PALSAR よりも新しい ALOS-2/PALSAR-2 に基づく成果も示されるようになってきており、研究は着実に発展しているといえる。

4. 2. 5 斜面崩壊

斜面崩壊に関する研究では、地形変化や、傾斜量などに斜面の安定性に関連する地形指標や、樹高・樹木密度などに対応する植生指標などが対象となる。これを踏まえて、斜面崩壊の解析等で想定されるスケール等について以下のように整理した（表 4.2.2）。

空間スケールは、筆者がこれまで研究で扱った斜面崩壊の事例（新潟県出雲崎町、広島県庄原市、山口県防府市など）を踏まえて数百 m～数 km 四方とした。地形変化の把握では、衛星 SAR のデータを用いた干渉 SAR や、航空レーザ測量データの差分による崩壊土量の推定などを可能とするため、アーカイブが必要である。また、頻繁に崩壊が発生しているような斜面では、繰り返しの観測も必要である。一方、指標の解析では観測の頻度はさほど重要でないが、コストの点からアーカイブが活用できることが重要である。空間分解能と高さ精度は、地形変化の把握については衛星 SAR の分解能などを踏まえて、それぞれ 10 m 以下とした。また、指標の解析については、本研究で用いた点群密度（3 点/m²）や航空レーザ測量の一般的な高さ精度（15 cm 程度；国土地理院，2016d）を踏まえて、それぞれ 1 点/m² 程度以上、数十 cm 以下とした。

次に、空間スケール・分解能・高さ精度とセンサとの対応を図 4.2.7 に示した。斜面崩壊に伴う地形変化の把握は、地表状態の変化が大きいため干渉 SAR の適用は難しいが、航空レーザや地上レーザを用いれば数十 cm 以下の高さ精度で可能である。これに関連して、航空レーザと地上レーザによる解析を組み合わせて、斜面崩壊に伴う土砂生産量を推定する研究が近年現れてきた。今泉（2015）は、赤崩などにおける土砂の生産様式に、岩盤の風化等による面的で比較的浅い侵食（年 3 cm 以下程度）と、大規模崩壊地内で二次的に発生する崩壊現象（侵食深 5 m/回以上）があることを示しており、地上レーザと航空レーザのセンサ間の高さ精度の違いと抽出さ

れた現象の違いが対応しているとみなせる。このように複数のレーザセンサの組合せは、斜面崩壊の発生メカニズムの解明に貢献すると考える。

斜面安定性に関わる地形・植生指標については、地形の分野では傾斜等と斜面崩壊の多寡との関係が主に検討され（岩橋ほか, 2008, 2009 など）、植生の分野では樹高・樹木本数・断面積等の導出が主に行われてきた（Nelson et al., 1984; Næsset, 1997a; Næsset, 1997b など）。本研究では、航空レーザ測量データの処理により得られた DTM・DSM・地表透過率等のプロダクトを解析することで、これまで別々に検討されてきた地形指標と植生指標を組み合わせ、斜面安定性の評価の精度を向上できることを示した。航空レーザ測量データの近年の蓄積も、この手法を適用する上でコスト面でのメリットとなる。

近年のコンピュータ技術の進展により、巨大な点群データの処理が可能となり、複数の要素を組み合わせ、解析することも容易になった。本研究はこの利点を活用し、植生の分野において阿部（1998）などが指摘していた樹木根系が斜面崩壊に耐性を持つことが、数 km 四方のような広範囲にも成り立つことを示した。

図 4.2.7 によると、航空レーザの代わりに地上レーザも指標の解析に適用可能である。地上レーザは点群密度が高いため、樹木密度など本研究では今後の課題とした部分についても対応できる可能性がある。一方、データ密度が高いため現状では空間スケールを狭めざるを得ないが、今後の技術の進展により、広域的な解析も可能になるであろう。また、さらにデータ密度が上げれば、樹木本数などの推定誤差が低減するため、指標がより高精度化し、地形、植生の斜面安定性への寄与がより明らかになると期待される。

以上を踏まえて、複合的把握・解析手法による斜面崩壊の研究の成果と今後の可能性について表 4.2.3 に示した。斜面崩壊により地表の状態が劇的に変化するため、地形変化の把握については干渉 SAR の適用は難しく、従来は地上レーザなどの差分処理が中心であった。また、斜面安定性への寄与因子としての地形を扱った研究では、傾斜量などの地形に関する指標を主に検討してきた。本研究では、航空レーザ測量データを処理した DTM、DSM などのプロダクトを複合的に解析することで、地形・植生双方の指標化を可能とし、それらの指標で斜面の安定性を説明できることを示した。レーザ点群の処理では膨大なデータを扱わなければならないため、従来はコンピュータの能力から複合的な処理は難しかった。しかし近年は、状況が改善されつつあり、研究が進みつつある。地形変化の把握についても、大規模な崩壊であれば地上レーザ・航空レーザとともに抽出可能であり、センサの複合的な適用ができることが示されつつある。

(4.2 図表集)

表 4.2.1 能動型センサによる地形研究の成果の整理

研究の発展度	作成プロダクト	使用センサ	対象自然事象 (把握・解析対象)	研究成果	研究成果の波及対象
基礎的 地形 データ 作成	DEM	SAR(衛星・ 航空機)	火山噴火 (火口内の地形)	光学センサでは困難 な箇所の地形モデル 構築の基礎的な成果	火山成長モデル
	地表地震断 層分布図	地上レーザ	地震 (地表地震断層の 形状)	極めて詳細な地形変 化の把握	破壊過程の解 明
	津波浸水深・ 浸水高分布 図	MMS 航空レーザ	津波 (津波の浸水深・ 浸水高の分布)	広域の津波による被 害の分布の把握	津波の浸水シ ミュレーション
地形 データ を用い た応用	地形分類図 地形変化量 図(SAR干渉 画像)	航空レーザ SAR(衛星)	地すべり (地すべりによる 地形変化)	個々の地すべりブ ロックと地形変化量 の対応付け	地すべりの発生 メカニズム
	森林形状指 標(樹高・樹 木密度等)	航空レーザ	斜面崩壊 (森林の3次元要 素)	斜面の安定性評価に 有用な森林の3次元 要素に関する指標	斜面の安定性 評価

※下線付き太字で示したものは、複数のセンサを組み合わせたもの

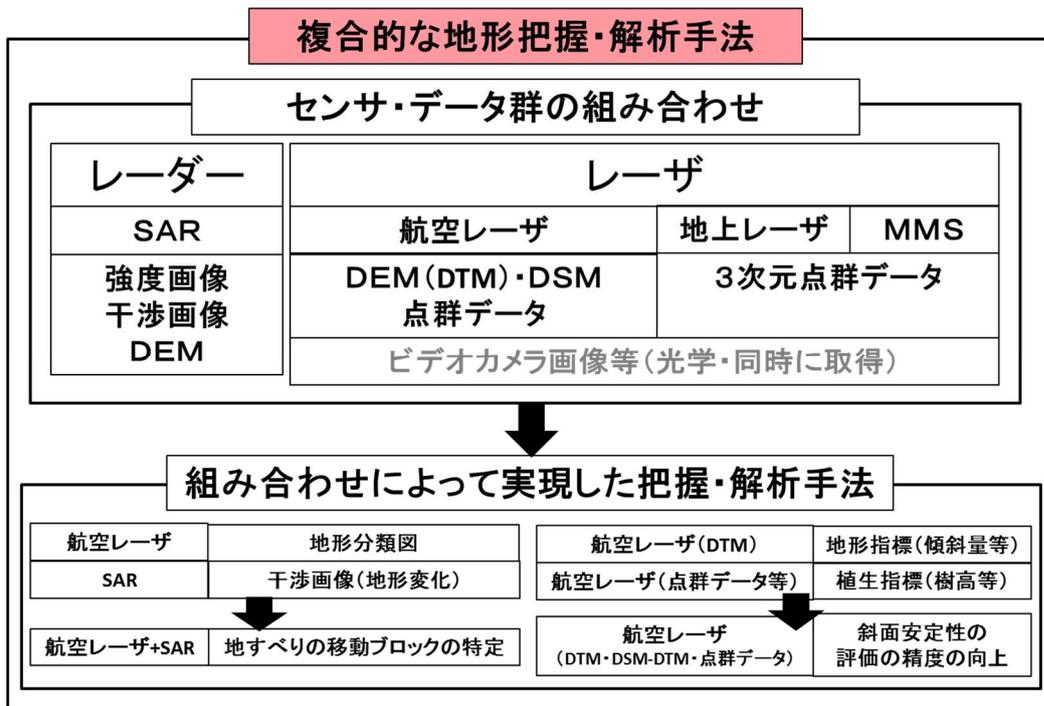


図 4.2.1 能動型センサデータの応用による複合的な地形把握・解析手法

表 4.2.2 事象の把握と解析に対応するスケール、分解能、高さ精度

把握・解析事象	空間スケール	時間スケール ^{※1} (観測頻度) (アーカイブ)		空間分解能	高さ精度	遮蔽物等 ^{※3}
火山噴火(微小な地形変化の把握) (大規模な地形変化の把握)	数百m～数km 数百m～数km	○	○	～数十m ～数m	～数cm ～10 m	植生 噴煙
		○	—			
地震(地表地震断層の把握) (地形変化の把握)	100 m～数十km 100 m～数百km	—	—	～1 m ～数十m	～数十cm ～数十cm	植生 植生
		—	○			
津波(地形変化の把握) (浸水深の把握)	数十m～数百m 数km～数百km	—	○	～数cm (点群1点あたりの広さ) 10 m～1 km (計測密度)	～数cm ～1m	植生 ※4
		—	—			
地すべり(地形分類図) (地形変化の解析)	数十m～数km 数十m～数km	—	—	～数十cm ～数十m	～数十cm ～10 cm	植生 植生
		○	○			
斜面崩壊(地形変化の把握) (地形・植生指標の解析)	数百m～数km 数百m～数km	○	○	～10 m ～1 m四方位程度 (点群1点あたりの広さ)	～10 m ～数十cm	植生 植生
		—	※2			

※1...○は、「観測頻度」では繰り返し観測が必要な場合。「アーカイブ」では過去データとの対比が必要な場合。

※2...コストの観点ではアーカイブが活用できることが重要である。

※3...熱帯域などにおける観測では、これらに加え積雲が遮蔽物となる。

※4...上空からの観測で痕跡を測るのは困難なため、空中写真や人工衛星・航空機搭載センサは原則使えない。

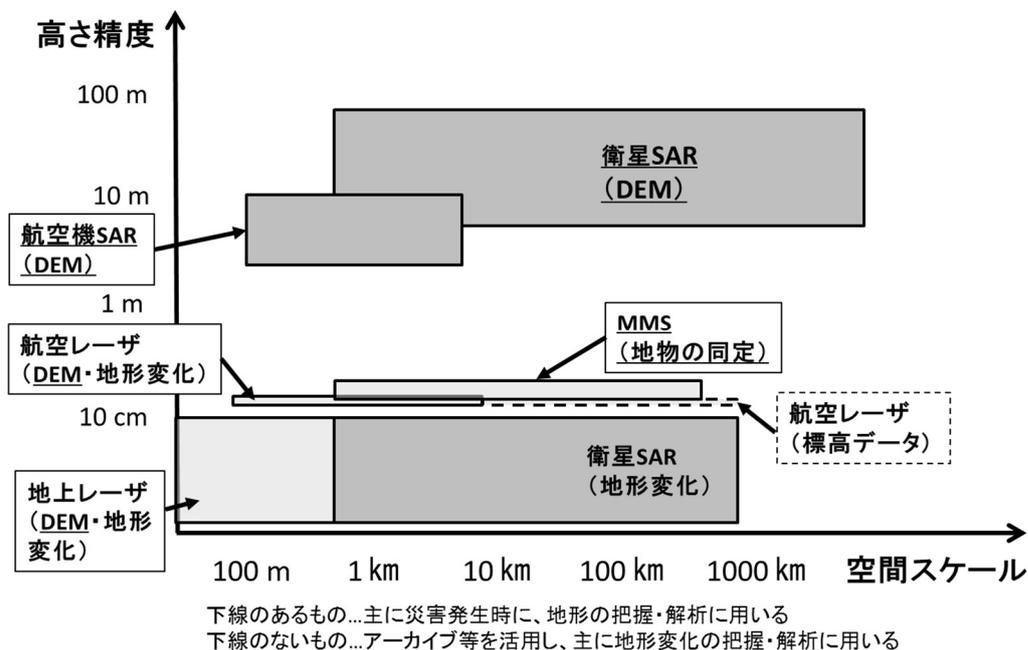


図 4.2.2 センサ別の空間スケール・高さ精度の対応

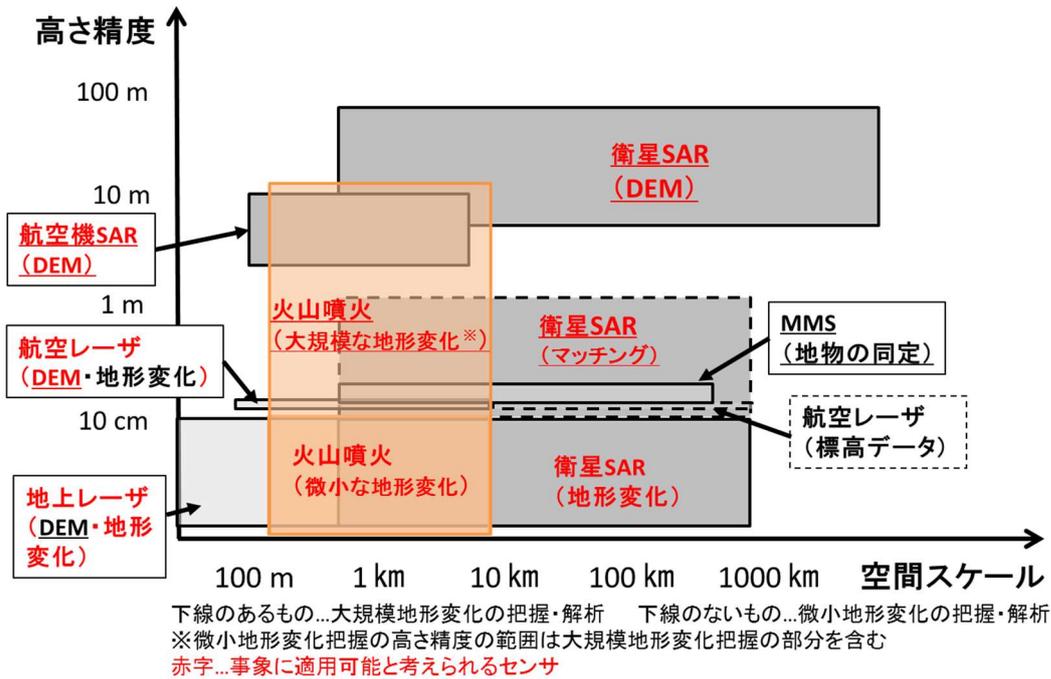


図 4.2.3 センサ別の空間スケール・高さ精度の対応と火山噴火に関する地形の把握・解析との関係

表 4.2.3 複合的手法の適用による地形の把握・解析研究の成果と可能性

把握・解析事象	単一の能動型センサによる手法、及び空中写真・光学センサとの組合せ	複合的な把握・解析手法の導入での成果、および今後の可能性	複合的な把握・解析手法の導入により想定される貢献
火山噴火	山体の地形変化の把握(干渉SAR、SAR画像(マッチング)) <u>火口周辺の地形の把握(干渉SAR)</u>	火口周辺の地形の大規模な変化の時系列的な把握(SAR画像+LIDAR)	火山活動のメカニズムの解明
地震	広域の地形変化の把握(干渉SAR) <u>地表地震断層の把握(TLS・LIDAR)</u>	高精度な3次元の地形変化の把握(干渉SAR+TLS)	地震に伴う地形変化の全体像の解明
津波	地形変化の把握(TLS・LIDAR) 津波の浸水深の把握(現地調査等)	<u>津波の浸水深の把握(MMS+LIDAR)</u> →津波に対する地形の影響の解析(MMS+LIDAR)	津波に対する地形の影響の解明
地すべり	地形変化の把握(干渉SAR) 地形分類図(空中写真・LIDAR)	<u>活動的ブロックの解析(干渉SAR+LIDAR)</u>	地すべりの発生メカニズムの解明
斜面崩壊	地形変化の把握(TLS・LIDAR) 地形指標の導出(LIDAR-DTM)	地形変化の把握(TLS+LIDAR) <u>地形指標・植生指標の複合的な導出(LIDAR-DTM・DSM等)</u>	斜面崩壊の発生メカニズムの解明 斜面安定性への寄与因子の解明

LIDARは航空レーザー、TLSは地上レーザーの意
赤字下線は本研究の成果

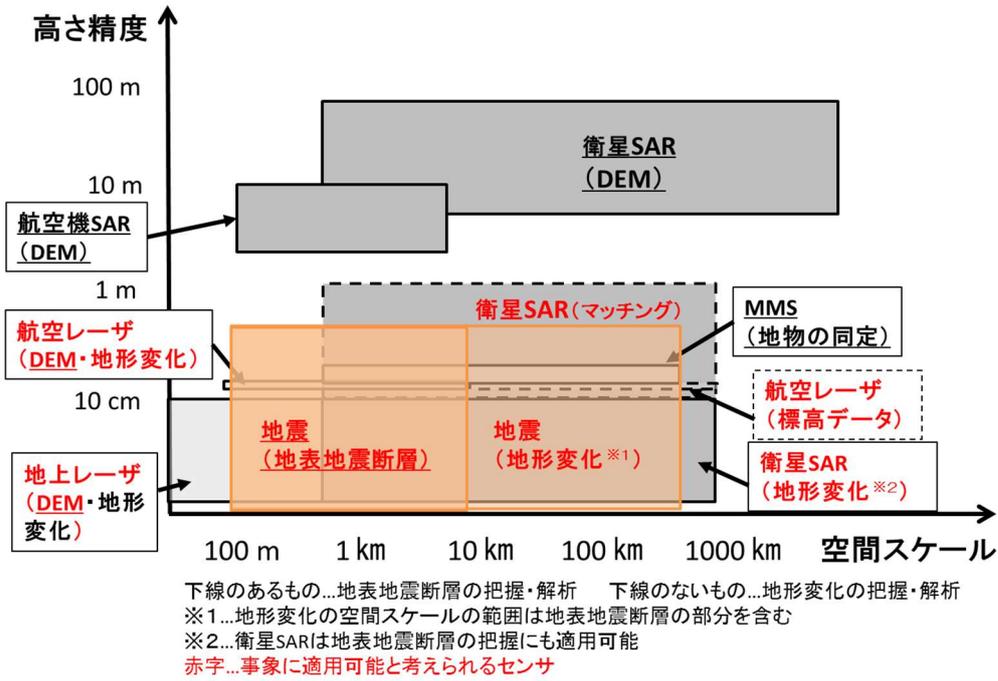


図 4.2.4 センサ別の空間スケール・高さ精度の対応と地震に関する地形の把握・解析との関係

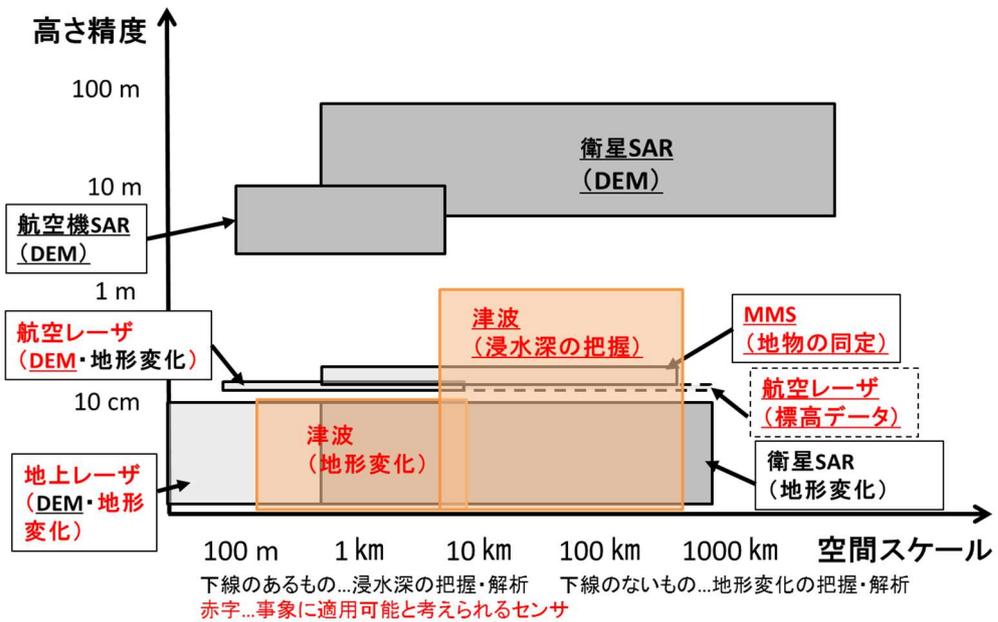


図 4.2.5 センサ別の空間スケール・高さ精度の対応と津波に関する地形の把握・解析との関係

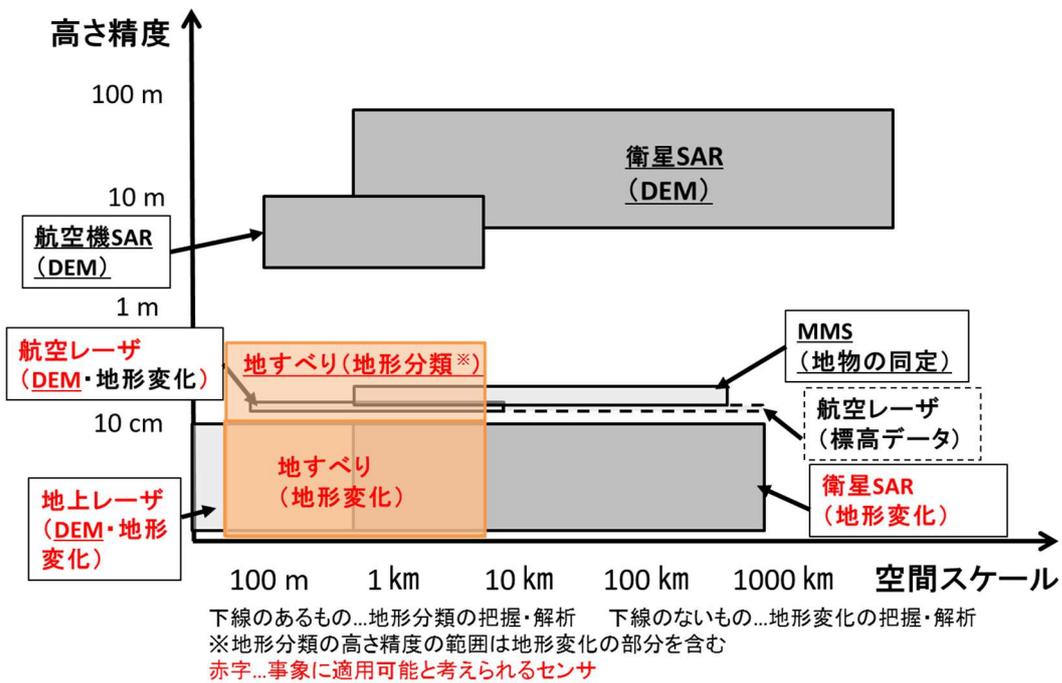


図 4.2.6 センサ別の空間スケール・高さ精度の対応と地すべりに関する地形の把握・解析との関係

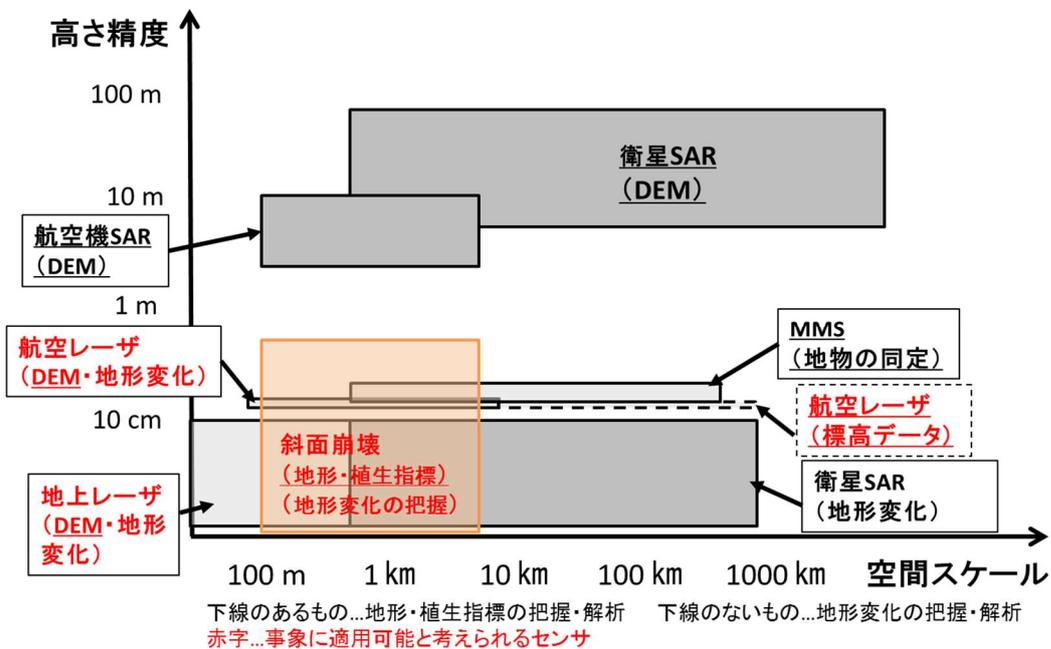


図 4.2.7 センサ別の空間スケール・高さ精度の対応と斜面崩壊に関する地形の把握・解析との関係

4. 3 本研究の総括

本研究では、レーダー、レーザなどの能動的センサを活用した地形の把握と解析を、災害分野の研究に適用した事例を示した(表 4.1.1)。本研究の成果のうち、地形に関連する情報の把握が主である「衛星 SAR-DEM による地形の把握」と「航空機 SAR-DEM による地形の把握」と、「地上レーザによる地表地震断層の把握」や「MMS による津波被害の把握」をあわせたものは、DEM の作成及びその直接的利用が主である。したがって、第一章で定義した研究の発展度としては、「基礎的地形データ作成」にあたりとみなされる。他方、「衛星 SAR による地すべりの解析」や「航空レーザによる森林の形状と斜面安定性の解析」は、地すべりの発生メカニズムの解明や樹木の斜面安定性への影響評価も解析しているため、研究は「地形データを用いた応用」まで発展したとみなされる。これらを踏まえて、本研究の成果を「基礎的地形データ作成」の 3 項目(①~③)、および「地形データを用いた応用」の 2 項目(④・⑤)として以下のようにまとめた。

- ① 衛星・航空機による SAR-DEM の作成の研究は、急峻な火山などでも一般的な地形図作成の精度に準ずる DEM が作成できることを示した。この成果は、災害発生時等における地形モデルの構築に関する基礎と位置づけられ、火山噴火時における火口内の地形成長の把握などの研究への発展につながる。
- ② 地上レーザによる地表地震断層の把握の研究は、極めて詳細な地形変化を把握できることを示しており、地震活動に伴う破壊活動の解明につながる。
- ③ MMS による津波の浸水深の把握の研究は、広域の津波被害分布が把握できることを示しており、津波の浸水シミュレーションにおける検証用データの整備に役立つ。
- ④ 衛星 SAR と航空レーザの組合せによる地すべりの解析の研究は、地震の研究等で行われてきた地形変化の面的な把握から一歩進んで、個々の地すべりブロックと地形変化量の対応付けを可能としており、地すべりの発生メカニズムの解明につながる。
- ⑤ 航空レーザによる森林の形状と斜面安定性の解析の研究は、斜面安定性の評価の精度の向上につながる森林の 3 次元要素に関する指標が得られることを示しており、傾斜量や凹凸度など地形を中心とする従来の評価を多角化させた。

以上のように、能動型センサを用いて得られたデータは、地震、津波、火山噴火、地すべり、斜面崩壊などの様々な災害をもたらす自然事象の把握、災害の発生メカニズムの解析、および今後の災害発生予測のシミュレーションに寄与することが分かった(表 4.2.1)。

また、表 4.2.1 の内容を、図 1.3.3 などに示した研究の発展度とスケールの関係に加えたものを図 4.3.1 に示した。図として整理するために一部の研究成果の名称は簡略化した(例えば、「LIDAR による斜面安定性の解析」など)。また、本研究で扱った航空レーザ DEM、地上レーザ DEM、MMS で得られた高さデータなども中間的成果として加えた。さらに、図では地形データの利用・応用について発展をもたらしたものを示した。本研究で示した事例は、「基礎的地

形データの作成」「地形データを用いた応用」の多くの部分に関連し、既存研究からの発展に貢献したことが分かる。スケールの観点でも、表 4.1.1 に整理したように、本研究は数百 m 四方を対象とした地上レーザから全球規模を対象とした地球地図データまで、多様な範囲をカバーした。以上から、本研究は第 1 章の末尾で設定した 3 つの目的を満たしたといえる。

本研究では、単一のセンサ・プロダクトのみを用いた検討には限界があり、複数のセンサ・プロダクトの組合せが有効なことを指摘した。このような組合せに基づく研究について、今後のありべき姿を含めて図 4.3.2 にまとめた。このような複合的な地形把握・解析の手法を今後適用していくことにより、災害に関連した自然事象の発生メカニズムや、それを規定する要因の解明が発展すると期待される。

(4.3 図表集)

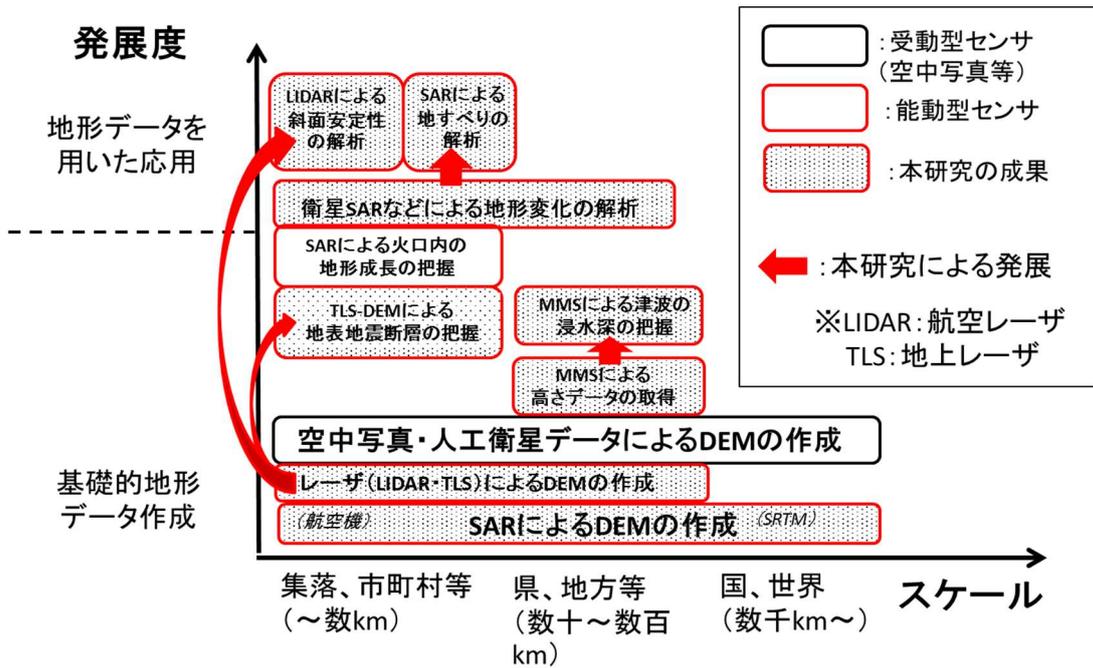


図 4.3.1 地形研究に関連したリモートセンシング技術の活用における本研究の成果の位置づけ

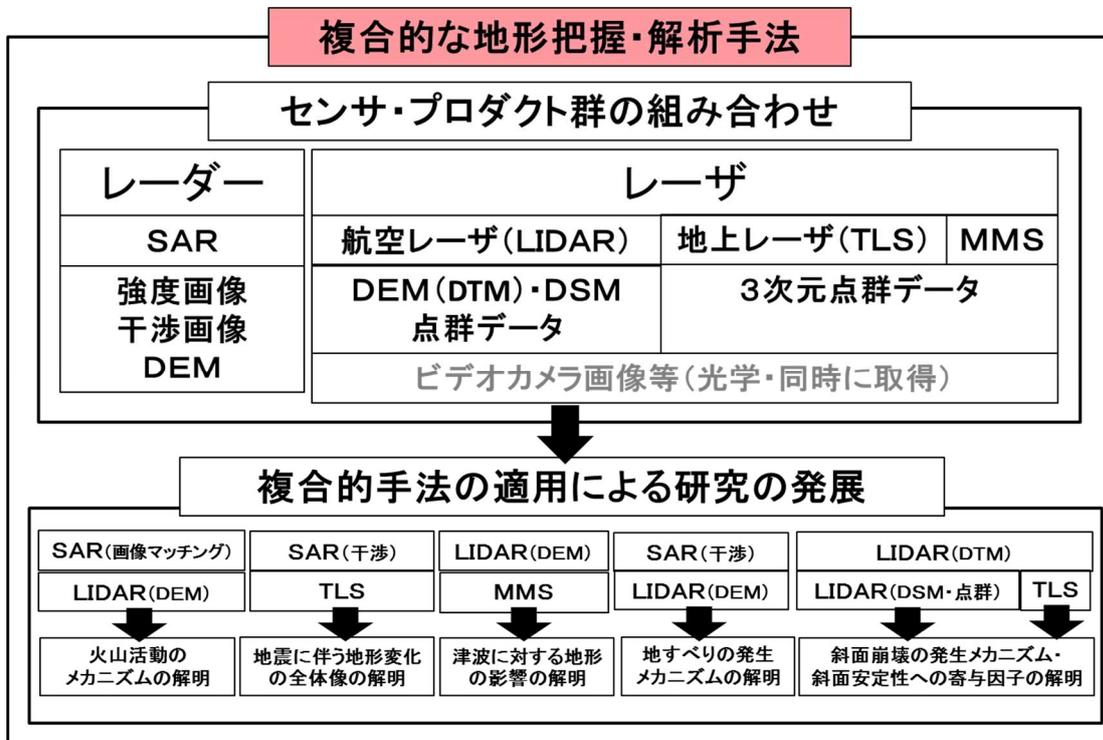


図 4.3.2 複合的な地形把握・解析手法の適用による研究の発展

4. 4 自然環境学における本研究の意義

自然環境学は、自然環境の特性を知ることや人間活動と自然環境のかかわりの履歴を知ることが重要なテーマとなっている。地震、火山噴火、風水害などの「災害」の発生は、そのかかわりの制約条件として働く。したがって、「災害」に関連する事象を扱った本研究は、自然環境学の研究としても位置づけられる。以下では、地圏・気圏・水圏・生物圏に代表される自然環境学の各分野に対して、能動型センサを用いた地形研究の波及効果について述べる。

自然環境学の各分野では、地形の把握や解析に関連した研究成果が蓄積されている。例えば生物圏では、林学分野において森林形状の把握などを対象として航空レーザ測量データを活用した研究が行われている。例えば、Pitkänen et al. (2004) は航空レーザを用いて、1 m²あたり10点の照射数のデータから個々の樹木の抽出を試みており、Tansey et al. (2009) は地上レーザを用いて、個々の樹木の自動抽出を行った上で胸高直径を2~4 cmの精度で計測した。水圏については、SARで氷河の動きを分析したStrozzi et al. (2002)、氷河・氷床のモニタリングをした山之内 (2013)、航空レーザ測量で氷床の収支バランスを扱ったKrabill et al. (2000) やArendt et al. (2002) などがある。さらに地圏については、レーザ地形モデルから段丘や扇状地などの地形分類を行ったAsselen and Seijmonsbergen (2006) や、SRTMデータなどを用いて地形の傾斜量や凹凸度の観点から世界の地形分類を行ったIwahashi and Pike (2007) などがある。加えて、航空レーザ測量に基づく水圏と地圏の双方に関わる研究として、Lohani and Mason (2001) やThoma et al. (2005) は潮汐流路の位置や河川浸食の状況の把握を行った。

これらを踏まえて、能動型センサデータによる地形研究の自然環境学の各分野への波及を図4.4.1に整理した。災害研究の深化に寄与したレーダー、レーザ等の能動型センサによる地形研究の応用は、自然環境学が扱う多数のテーマに波及している。そして、地圏・水圏・生物圏における自然事象は、人間活動とも深く結びついている。

本研究では、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学研究系(2011)が近年の自然環境学のテーマとして挙げた、①自然環境のメカニズムの解明を進める、②自然環境に生じた問題の解決に貢献する、③自然環境の新たな状況を設定する、の3つのうち、斜面の安定性評価など②の内容を含みつつ、基本的には①を中心に災害・環境に関する研究成果を提示した。③について、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学研究系(2011)は、「何をもって問題の解決とするのかという問いであり、市民の価値判断が重要な位置を占めるとともに、研究手法として市民との協働を重視する新たな取組が必要」と記している。また、東樋口(2015)も環境学が環境問題の解決に重要と記し、社会科学や人文科学など自然科学にとどまらない取組が必要としている。本研究で提示した「複合的な地形把握・解析手法」は、自然環境の詳細かつ正確な把握につながるものであり、人類が自然環境にアプローチする際の行動判断の根拠を与える。この点で本研究は③にも関連すると考える。今後、複合的な手法が発展し、ハザードやリスク因子の評価がより正確にできるようになれば、人々の行動判断にも強く貢献するであろう。例えば、MMS計測データにより特定の地震に伴う津波の浸水深の分布(ハザード)が明らかになれば、今後想定され

る地震に対するシミュレーションの精度が向上する。また、人為的な土地利用の変化など被害の多寡を規定する要素（リスクエレメント）についても、DEM と画像データ等を組み合わせた「複合的な地形把握・解析手法」がその把握をより容易化する。

また、能動型センサによる計測データのアーカイブは拡大を続けている。例えば、衛星 SAR については ALOS/PALSAR などの大量のアーカイブが比較的安価に入手可能であり、SAR 干渉画像についても自然災害に伴う地形変化のデータが国土地理院のホームページに示されている（国土地理院，2016a）。また、航空レーザ測量は国土交通省の地方整備局、国土地理院、遅行公共団体、民間航測企業等により広く実施されており、現在では平野部の大半の詳細な標高データが利用可能である。なかでも、基盤地図情報の一部となっている 5 m メッシュ標高データは国土の広範をカバーしており、2016 年 11 月現在、無償で入手可能である（国土地理院，2014）。このように、データの面からも研究のフィージビリティが拡大しており、自然環境学に多様な貢献をすることが可能な状況になってきている。

自然災害は特定の場所に偏って発生するため、危ない場所を避けるのが防災の原則だが（大森ほか，2005）、居住域の拡大等により人間が自然災害を完全に避けるのは不可能であり、災害をもたらす自然事象の発生も不可避である。例えば今後の津波対策では、高い防潮堤を築く、避難タワーを建設する、高台移転をする等の動きがあるが、いずれも限界がある。堤防を低くするなどハード面を削れば費用は下がるが、災害に襲われる可能性は高くなる。一方、堤防を高くするなどハード面を充実させれば、災害に襲われる可能性は低くなるが費用は上がり、景観が悪化し生活空間と海洋との一体性が失われる。これまではハザードとリスクの評価の精度に課題があったため、例えば東日本大震災でも「想定外」という言葉が多く用いられたが、自然事象に対する評価指標が高精度化すれば、人々が判断を行う基準となるハザードやリスクの評価がより正確になる。本研究で提示した「複合的な地形把握・解析手法」は、このような適切な評価に貢献するものであり、自然災害に対する人間活動の在り方に関する判断材料を充実させ、自然環境学が目指す人々と協働する学問の実現につながると考える（図 4.4.2）。

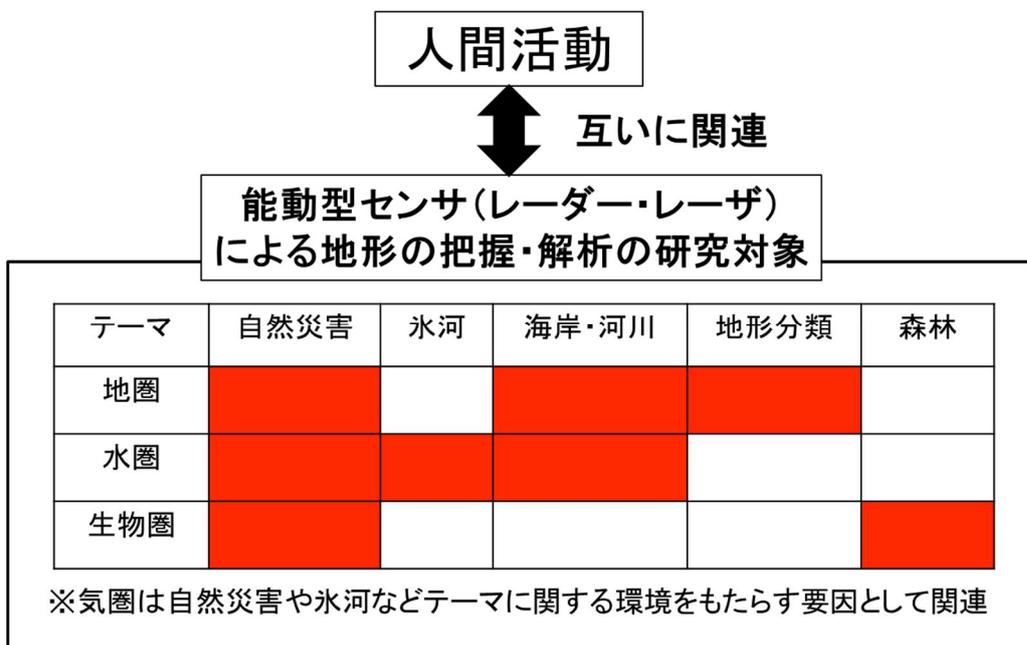


図 4.4.1 能動型センサデータによる地形研究の自然環境学への波及

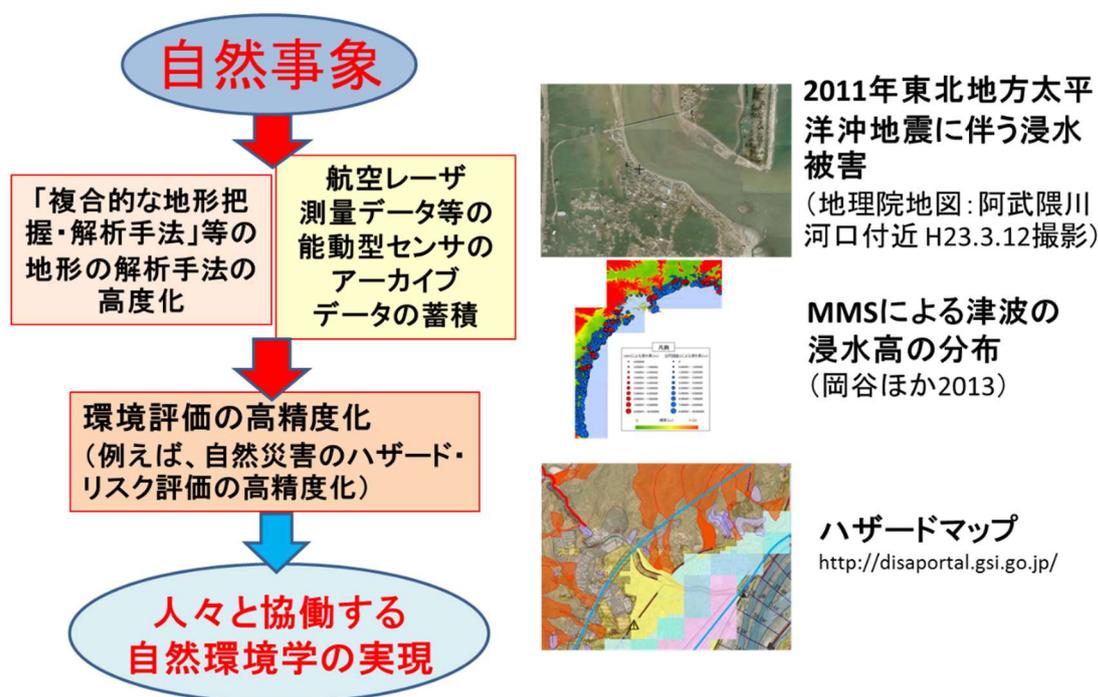


図 4.4.2 能動型センサによる地形研究の自然環境学への波及

(国土地理院, 2016b; 岡谷ほか, 2013a; 国土交通省, 2016b を一部改変)

右上の写真は阿武隈川河口付近 (地理院地図: H23.3.12 撮影)

5. おわりに

本稿では、自然災害に関連した地形の把握と解析に対するリモートセンシング能動型センサの応用の発展させることを目的に、一連の研究を行い、災害研究と自然環境学における意義を考察した。その結果、本研究で示した能動型センサの応用が、自然災害の把握や要因の解明、およびハザード評価につながり、その効果が自然環境学の様々な対象にも波及することが判明した。なかでも、センサやデータを組み合わせた「複合的な地形把握・解析手法」が、リモートセンシング能動型センサの応用をより発展させる重要な鍵であることが示された。

今後は個別のテーマについて深化を図ることも必要だが、表 4.1.6 など示した新たな複合的手法の適用も新たな研究も課題の一つになる。また、本研究で示した手法を災害分野とともに林学などの関連分野にフィードバックさせることも重要な課題である。

最後に、本研究と関連する新技術の動向を踏まえた今後の研究の可能性についてまとめる。本研究で扱ったデータは、分解能やスケール等の点で多様性があり、それが様々な研究分野への応用を可能にしているが、現実には航空レーザや航空機 SAR などには運用コストの問題があり、得られるデータの範囲が限られる場合が多い。しかしながら、ビッグデータが流通する時代の中で、スケールの問題について克服可能な選択肢も示されつつある。例えば、海外における取組では、NSF (National Science Foundation: 全米科学財団) の支援を受けた Open Topography Facility が、SRTM のデータや航空レーザなどによるレーザ計測データを Open Topography のサイトで公開している (Open Topography Facility, 2017)。このサイトでは、米国のほかニュージーランドのデータなども公開されている。また、ドイツでも航空レーザ関連の情報公開が進んでいる (Die Landesregierung Nordrhein-Westfalen, 2017)。他方、国内でも航空レーザ測量データを、国土地理院が基盤地図情報 (数値標高モデル) の 5 m メッシュ標高データとして提供を行う (国土地理院, 2014) など、無償又は安価で利用可能なアーカイブデータが増えている。現時点 (2017 年 3 月) における航空レーザ測量データによる 5 mDEM の整備面積は明示されていないが、地理院地図には整備範囲が本州、四国、九州の大部分と平野部を中心とした北海道の一部に及んでいることが示されている (国土地理院, 2016c)。このように、航空レーザ測量によるデータが我が国全体を覆いつつある。また、先の熊本地震でも断層周辺で航空レーザ測量が実施されたように、災害発生などに合わせ新たなデータが取得されている (国土地理院, 2016f)。したがって、過去のデータとの比較等により、地表地震断層の把握など地形の把握・解析につながるケースは今後増えていくだろう。さらに、近年 UAV がリモートセンシングに応用されているが、能動型センサを UAV に搭載して自然災害に関連する地形データを取得する機会も今後増えていくと考える。このような形で、能動型センサデータによる地形の把握と、その成果を活用した地形の解析と災害研究への応用が、今後も発展し続けるだろう。

謝辞等

本研究をとりまとめるにあたり、東京大学空間情報科学研究センターの小口高教授より全般にわたりご指導ご助言をいただいた。また、東京大学大学院新領域創成科学研究科の斎藤馨教授、須貝俊彦教授、東京大学大学院理学系研究科の池田安隆准教授、東京大学空間情報科学研究センターの早川裕弉准教授にも貴重なご助言をいただいた。加えて、本研究を実施するにあたり、筆者が中心となった関係論文の共著者として、国土地理院の以下の方々にご協力いただいた（50音順、敬称略）。

安倍雅俊、乙井康成、榎場新一、岸本紀子、小荒井衛、佐々木久和、佐藤浩、中川勝登、中埜貴元、永山透、松尾馨、丸山弘通、茂木公一、矢口秀則、山田陽子、渡辺信之

衛星 SAR による地すべりの解析の研究を進めるにあたっては、秋田県雄勝振興局農林部より提供された移動杭データを使用し、秋田県雄勝振興局建設部より提供された GPS 観測データを使用した。ALOS/PALSAR データは JAXA/MITI により開発された同センサによる観測データを JAXA より提供していただき、国土地理院測地部宇宙測地課の協力を受けて解析した。また、本研究の全般にわたり、国土地理院地理地殻活動研究センター地殻変動研究室の諸氏及び国土地理院応用地理部防災地理課の関口辰夫氏にご助言いただいた。本研究の成果は国土地理院特別研究費「合成開口レーダーによる地すべりの監視に関する研究」による。

地上レーザによる地表地震断層の把握と、MMS による津波被害の把握の研究を進めるにあたっては、それぞれ計測について(一社)日本測量機器工業会の協力を得た。また、MMS による津波被害の把握の研究では現地調査等について、国土地理院応用地理部、国土地理院東北地方測量部及び国土地理院地理地殻活動研究センター地理情報解析研究室の協力を得た。さらに、処理の一部を東京大学理学部の森大樹氏、京都大学防災研究所の中居楓子氏に手伝っていただいた。MMS による津波被害の把握の研究には、科学研究費補助金（課題番号: 24240114: 研究代表者: 鈴木康弘名古屋大学教授）の予算を使用した。

航空レーザによる森林の形状と斜面安定性の解析の研究を進めるにあたっては、国土交通省国土技術政策総合研究所岡本敦氏、水野正樹氏、佐藤匠氏、(独) 土木研究所小山内信智氏、(独) 森林総合研究所大丸裕武氏、三森利昭氏、村上亘氏、国土交通省水管理・国土保全局砂防部越智英人氏及び国土交通省国土地理院神谷泉氏から有益なコメントをいただいた。本研究の成果は国土地理院特別研究費「航空レーザーデータを用いた土地の脆弱性に関する新たな土地被覆分類の研究」による。

また、衛星 SAR-DEM による地形の把握及び航空機 SAR-DEM による地形の把握の研究は、建設省の総合技術開発プロジェクト「先端技術を活用した国土管理技術の開発」及び「災害等に対応した人工衛星利用技術に関する研究」に関連して実施した。

ここに記し、心より感謝の意を表します。

最後に、本研究で扱った各災害に関連して、被災されました方々及びその関係者の方々に対し、心よりお見舞い申し上げます。

参考文献

- 阿部和時 (1998) : 樹木根系の斜面崩壊防止機能. 森林科学, 22, 23-29.
- Abe, K. and Ziemer, R. R. (1991) : Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. Canadian Journal of Forest Research, 21-7, 1012-1019
- Abellan, A., Vilaplana, J. M. and Martínez, J. (2006) : Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). Engineering Geology, 88-3&4, 136-148.
- Ahmed, A., Nagai, M., Tianen, C. and Shibasaki, R. (2008) : UAV based monitoring system and object detection technique development for a disaster area. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing, 373-378.
- アジア航測株式会社 (2012) : アジア航測における東日本大震災直後の復旧に向けた空間情報の活用. 先端測量技術 (APA), 103, 34-37.
- 秋山実・佐藤浩・小荒井衛・本間信一 (2007) : 雪崩実績図を用いた雪崩の発生条件分級加点図の評価とその改良. 写真測量とリモートセンシング, 46-2, 4-16.
- Al-Rousan, N., Cheng, P., Toutin, T. and Zoj, M. J. V. (1997) : Automated DEM extraction and orthoimage generation from SPOT level 1B imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 63, 965-974.
- Anderson, J. M. and Ramey, E. H. (1973) : Analytic Block Adjustment, Photogrammetric Engineering, 39-10, 1087-1096.
- Arendt, A. A., Echelmeyer, K. A., Harrison, W. D., Lingle, C. S. and Valentine, V. B. (2002) : Rapid Wastage of Alaska Glaciers and Their Contribution to Rising Sea Level. Science, 297(5580), 382-386.
- Asselen, S. V. and Seijmonsbergen, A. C. (2006) : Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. Geomorphology, 78-3&4, 309-320.
- Bagley, J. W. (1941) : Aerophotography and aerosurveying. McGraw-Hill, New York, 324p.
- Baldo, M., Bicocchi, C., Chiochini, U., Giordan, D. and Lollino, G. (2009) : LIDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy. Geomorphology, 105-3&4, 193-201.
- Bitelli, G., Dubbini, M. and Zanutta, A. (2004) : Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. Proceedings of the XXth ISPRS congress, vol XXXV, part B5, Istanbul, 246-251.
- Brückl, E., Brunner, F. K. and Kraus, K. (2006) : Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. Engineering Geology, 88-3&4,

149-159.

ブラハト, T. J. ・ブルクハルト, R. (1988) : 写真測量の歴史. 日本写真測量学会誌, 日本写真測量学会, 201p.

Canadian Space Agency (2011) : RADARSAT – Satellite Characteristics.

<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/radarsat-tableau.asp>

(最終閲覧日 : 2017.03.01)

Chandler, J. (1999) : Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 51-63.

Chou, T. Y., Yeh, M. L., Chen, Y. C. and Chen, Y. H. (2010) : Disaster monitoring and management by the unmanned aerial vehicle technology. *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5–7, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7B*, 137-142.

Die Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2017) : #opennrw mitreden-mitmachen-mitgestalten. <https://open.nrw/de> (最終閲覧日 : 2017.03.01)

DLR (2014) : TerraSAR-X - Germany's radar eye in space. <http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10377/> (最終閲覧日 : 2017.03.01)

土木研究所 (2011) : 4月11日の余震でいわき市に出現した地表地震断層 (第1報～第6報), (平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震等に関する土木研究所の対応)

<https://www.pwri.go.jp/jpn/research/disaster/touhoku-zishin/doboku-taiou/>

(最終閲覧日 : 2017.03.01)

独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ雪崩・地すべり研究センター (2010) : 平成16年新潟県中越地震により発生した地すべりの実態調査. 土木研究所資料, 4187, 238p.

土志田正二・小口高・中村剛 (2009) : 詳細地形データを用いた尾根領域の自動抽出と崩壊発生危険地域の評価. *CSIS DAYS 2009 研究アブストラクト集*, p.8.

Ehsani, A. H. and Quiel, F. (2008) : Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. *Geomorphology*, 99, 1–12.

Faller, N. P. and Meier, E. H. (1995) : First Results with the Airborne Single-Pass DO-SAR Interferometer, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33-5, 1230-1237.

Fialko, Y., Sandwell, D., Simons, M. and Rosen, P. (2005) : Three-dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit. *Nature*, 435, 295-299.

Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L. and Carbonneau, P. E. (2013) : Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Process and Landforms*, 38-4, 421-430.

Froger, J.-L., Merle, O. and Briole, P. (2001) : Active spreading and extension at Mount Etna imaged by SAR interferometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 187-3&4, 245-258.

Fruneau, B., Achache, J. and Delacourt, C. (1996) : Observation and modelling of the Saint-

- Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265-3&4, 181-190.
- 畚野信義 (1981) : 合成開口レーダ. 日本リモートセンシング学会誌, 1-1, 49-93.
- 藤本将光・小杉賢一郎・林祐妃・谷誠・水山高久 (2011) : 数値標高モデル (DEM) の空間分解能の違いが斜面安定解析に及ぼす影響. 砂防学会誌, 64-3, 3-10.
- 藤原智, 飛田幹男, 村上真幸 (1997) : 干渉 SAR による地殻変動検出と DEM の作成. 写真測量とリモートセンシング, 36-3, 71-76.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M. and Zebker, H. A. (1989) : Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94-B7, 9183-9191.
- Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., Thackray, G. D. and Dorsch, S. J. (2006) : Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73-1&2, 131-148.
- Göpfert, J. and Heipke, C. (2006) : Assessment of LiDAR DTM accuracy in coastal vegetation areas. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume XXXVI-3 (September 20-22, Bonn, Germany).
- Graham, L. C. (1974) : Synthetic interferometer radar for topographic mapping, *IEEE Proceedings*, 62-6, 763-768. (Current Version Published: 2005.06.28)
- Graham, L. N., Ellison, K. J. and Riddell, C. S. (1997) : The architecture of a softcopy photogrammetry system. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63, 1013-1020.
- Granshaw, S. I. (1980) : Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 10-56, 181-207.
- Gruen, A. (1994) : Digital close-range photogrammetry-progress through automation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 5, 122-135.
- Haile, A. T. and Rientjes, T. H. M. (2005) : Effects of LIDAR DEM resolution in flood modelling: A model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser scanning 2005"*, Enschede, the Netherlands, September 12-14, 168-173.
- Harding, D. J., Lefsky, M. A., Parker, G. G. and Blair, J. B. (2001) : Laser altimeter canopy height profiles: Methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 76-3, 283-297.
- Hart, C. A. (1940) : *Air photography applied to surveying*. Longman, London, 366p.
- 服部昌之 (1977) : 戦前撮影の大阪・京都の空中写真. 地図, 15-3, 17-30.
- 早川典久・舟山裕士・斎藤邦三・北村信 (1954) : 岩手県北上山地西縁より脊梁山地に亘る地域の第三系の地質, 東北鉱山学会, 1-10, 56-68.
- 早川裕弑・小口高 (2016) : 地形学における地上レーザ測量の活用. 地学雑誌, 125-3, 299-324.
- 早川裕弑・小口高・齋藤仁・小林明才・小松吾郎・後藤和久 (2015) : 三陸海岸における津波に

- よる浸食地形の特徴 —地上レーザ測量による解析—. 地学雑誌, 124-2, 241-258.
- Heipke, C. (1995) : State-of-the-art of digital photogrammetric workstations for topographic applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, 49-56.
- Henderson, S. T. and Pritchard, M.E. (2013) : Decadal volcanic deformation in the Central Andes Volcanic Zone revealed by InSAR time series. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14-5, 1358-1374.
- 平田泰雅 (2005a) : 航空機レーザースキャナを用いたスギ人工林計測におけるレーザー光の林冠透過率と地上照射密度の影響. *森林計画学会誌*, 39-2, 81-95.
- 平田泰雄 (2005b) : 航空機レーザースキャナデータを用いたヒノキ人工林における樹高と地形の関係. *日林誌*, 87-6, 497-503.
- Hodgson, M. E. and Bresnahan, P. (2004) : Accuracy of airborne lidar-derived elevation: empirical assessment and error budget. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70-3, 331-339.
- Huadong, G., Hao, L., Changlin, W. and Huanying, Y. (2000) : The coseismic deformation field of M-7.5 Mani Earthquake in Tibet mapped by ERS interferometric SAR data. *ERS-Envisat Symposium (16-20, October, Gothenburg, Sweden)*.
- Imai, Y., Setojima, M., Yamagishi, Y. and Fujiwara, N. (2004) : Tree-height measuring characteristics of urban forests by LIDAR data different in resolution. *Proceedings of the XXth ISPRS congress, vol XXXV, part B7, Istanbul*, 513-516.
- 今泉文寿 (2015) : 大規模崩壊地からの土砂生産過程の解明と生産量の推定. 科学研究費助成事業 研究成果報告書, 若手研究(B) 課題番号 24780141, 4p.
- 伊藤拓弥・松英恵吾・内藤健司 (2008) : 航空機 LiDAR による森林資源量推定—スギ・ヒノキの樹高・樹冠量による立木幹材積推定式の検討—. *写真測量とリモートセンシング*, 47-1, 26-35.
- 伊藤拓弥・松英恵吾・執印康裕・内藤健司 (2011) : 本数密度の異なるスギ・ヒノキ林における航空機 LiDAR による単木の立木幹材積推定. *写真測量とリモートセンシング*, 50-1, 18-26.
- 岩橋純子・神谷泉・山岸宏光 (2009) : LiDAR DEM を用いた表層崩壊のアセスメントに適する勾配と凹凸度の計算範囲の推定. *地形*, 30-1, 15-27.
- Iwahashi, J., Okatani, T., Nakano, T., Mamoru, K. and Otoi, K. (2014) : Landslide susceptibility analysis by terrain and vegetation attribute derived from pre-event LiDAR data: a case study of granitic mountain slopes in Hofu, Japan. *Proceedings of Interprevent International Symposium 2014 November 25-28 (in Nara, Japan)*, CD-ROM P-20.
- Iwahashi, J. and Pike, R. J. (2007) : Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*, 86, 409-440.

- 岩橋純子・佐藤忠・内川講二・小野康・下地恒明・星野実 (2011) : 航空レーザ測量の DEM から作成した余色立体図等を用いた変動地形の観察. 国土地理院時報, 121, 143-155.
- 岩橋純子・山岸宏光・神谷泉・佐藤浩 (2008) : 2004 年 7 月新潟豪雨と 10 月新潟県中越沖地震による斜面崩壊の判別分析. 日本地すべり学会誌, 45-1, 1-12.
- Jet Propulsion Laboratory (2015) : Shuttle Radar Topography Mission.
<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 情報通信研究機構 (2014) : 航空機搭載合成開口レーダ Pi-SAR2 による御嶽山の観測.
<http://www2.nict.go.jp/res/pisar2-ontake/> (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- Kääb, A. (2005) : Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya. *Remote Sensing of Environment*, 94-4, 463-474.
- 株式会社トプコン (2009) : 3D 移動体計測システム"IP-S2 シリーズ"を国内及びアジア地域で発売を開始. <http://www.topcon.co.jp/news/20091001-312.html> (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 株式会社トプコン (2013) : GLS-1500 3次元レーザースキャナー.
http://www.topcon.co.jp/positioning/products/pdf/GLS-1500_J.pdf
(最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 金田平太郎 (2008) : 餅転・柵木立に出現した地表地震断層の地上レーザー測量. *AFRC News*, 81, 14.
- 苅住昇 (1987) : 新装版 樹木根系図説. 誠文堂新光社, 1121p.
- Kato A., Moskal L. M., Schiess P., Swanson M. E., Calhoun D. and Stuetzle W. (2009) : Capturing tree crown formation through implicit surface reconstruction using airborne lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 113-6, 1148-1162.
- 建設省国土地理院 (1994) : 人工衛星画像処理技術の地図作成等への応用に関する研究作業 (第 II 期). 国土地理院技術資料 C1-No234, 33p.
- 木全敬蔵 (1997) : 空中写真撮影の歴史. *写真測量とリモートセンシング*, 36-1, 56-70.
- 木村宏 (1987) : 合成開口レーダによる立体視. *写真測量とリモートセンシング*, 26-SP1, 20-24.
- Kimura, H. and Yamaguchi, Y. (2000) : Detection of landslide areas using satellite radar interferometry, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66-3, 337-344.
- 木下篤彦・島田徹・笠原拓造・林栄明・名草一成・小川内良人・村木広和 (2013) : 回転翼型マイクロ UAV を用いた深層崩壊箇所の災害調査. *砂防学会誌*, 66-3, 51-54.
- 気象庁 (2015a) : 過去の気象データ検索. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 気象庁 (2015b) : 津波について. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/knownow/faq/faq26.html>
(最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 北原曜 (1998) : 森林が表面侵食を防ぐ. *森林科学*, 22, 16-22.
- 北村信 (1985) : 東北地方の基盤地質, 地すべり学会東北支部, 1-36.

- 高泰朋・福田真・中野一也・大伴真吾・高貫潤一・平松由紀子（2011）：地震変状調査における航空レーザ計測・空中写真撮影の有効性―地表地震断層・液状化現象を例として―，特集「東日本大震災への写真測量分野の活動」，写真測量とリモートセンシング，Vol.50，No. 4，236-242.
- 小荒井衛（1999）：国土地理院による航空機搭載型 SAR 初観測，写真測量とリモートセンシング，38-6，2-3.
- 小荒井衛・中埜貴元・岡谷隆基（2015）：東北地方太平洋沖地震による仙台平野・石巻平野の津波被災度と地形・土地利用との関連．地学雑誌，124-2，211-226.
- 小荒井衛・岡谷隆基・中埜貴元・神谷泉（2011）：東日本大震災における津波浸水域の地理的特徴．国土地理院時報，122，97-111.
- 小荒井衛・佐藤浩・中埜貴元（2010）：航空レーザ計測による植生三次元構造を反映した植生図の作成．地図，48-3，34-46.
- 小荒井衛・佐藤浩・中埜貴元・吉田剛司・山下亜紀郎・西謙一・長澤良太・日置佳之・司馬愛美子・中山詩織（2009）：世界自然遺産地域や里山地域での生物多様性評価のための航空レーザ計測データの活用 ―微地形と植生三次元構造との関連性の解析から―．（社）日本リモートセンシング学会 第47回学術講演会論文集（2009年11月），S13，2p.
- 小荒井衛・吉田剛司・長澤良太・中埜貴元・乙井康成・日置佳之・山下亜紀郎・佐藤浩・司馬愛美子・中山詩織・西謙一（2012）：航空レーザによる景観生態学図の作成，地図，50-3，16-31.
- 小林巖雄・立石雅昭・植村武（1993）：出雲崎地域の地質．地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，91p.
- 小林知勝（2015）：ALOS/ALOS-2衛星を用いた SAR 干渉解析による弥陀ヶ原火山・地獄谷の地殻変動について．日本火山学会講演予稿集（2015年9月），B1-16，1p.
- Kobayashi, T., Tobita, M., Nishimura, T., Suzuki, A., Noguchi, Y. and Yamanaka, M. (2011) : Crustal deformation map for the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, detected by InSAR analysis combined with GEONET data. Earth Planet Space, 63, 621-625.
- 国土地理院（2007）：伊豆大島火山航空レーザ測量データ。
<http://gisstar.gsi.go.jp/oshima/index.html>（最終閲覧日：2017.03.01）
- 国土地理院（2011a）：地すべり監視のための SAR 干渉画像判読マニュアル。
<http://gisstar.gsi.go.jp/sar-jisuberi/manual-top.htm>（最終閲覧日：2017.03.01）
- 国土地理院（2011b）：平成23年（2011年）4月11日福島県浜通りの地震（M7.0）に伴う地殻変動，<http://www.gsi.go.jp/cais/topic110425-index.html>（最終閲覧日：2017.03.01）
- 国土地理院（2011c）：2万5千分1浸水範囲概況図。
<http://www.gsi.go.jp/kikaku/kikaku40014.html>（最終閲覧日：2017.03.01）
- 国土地理院（2012a）：高精度な数値標高データの公開について―各地の津波被害予測等の高度化に期待―。<http://fgd.gsi.go.jp/otherdata/pdf/120328.pdf>（最終閲覧日：2017.03.01）
- 国土地理院（2012b）：6．海外の災害対策を支援する。

- <http://www.gsi.go.jp/GSI/BOUSAI/page6.html> (最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土地理院 (2014) : 基盤地図情報 (数値標高モデル) で提供しているデータの種類と概要.
<http://fgd.gsi.go.jp/download/DEMkind.htm> (最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土地理院 (2015a) : 地球地図を使った被災地周辺図.
http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/gm_disaster.html (最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土地理院 (2015b) : 航空レーザ測量データを用いた樹高等のデータ作成. <http://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho40069.html> (最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土地理院 (2016a) : 国土地理院干渉 SAR ホームページ. <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/> (最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土地理院 (2016b) : 地球地図トップページ.
<http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/globalmap.html> (最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土地理院 (2016c) : 地理院地図. <http://maps.gsi.go.jp/> (最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土地理院 (2016d) : 航空レーザ測量. http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_index.html
(最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土地理院 (2016e) : 干渉 SAR の 2.5 次元解析.
<http://www.gsi.go.jp/common/000139926.pdf> (最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土地理院 (2016f) : 平成 28 年熊本地震に関する情報.
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html> (最終閲覧日：2017.03.01)
- 国土交通省 (2016a) : 作業規程の準則. 一部改正 平成 28 年 3 月 31 日, 国土交通省告示第 565 号, 129p.
- 国土交通省 (2016b) : 国土交通省ハザードマップポータルサイト.
<http://disaportal.gsi.go.jp/hazardmap/pamphlet/kouhou.pdf> (最終閲覧日：2017.03.01)
- 駒村富士弥・渡辺武夫 (1977) : 樹木の斜面安定効果. 日林誌, 59-9, 338-340.
- Konecny, G., Lohmann, P., Engel, H. and Kruck, E. (1987) : Evaluation of SPOT imagery on analytical photogrammetric instruments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 53, 1223-1230.
- Krabill, W., Abdalati, W., Frederick, E., Manizade, S., Martin, C., Sonntag, J., Swift, R., Thomas, R., Wright, W. and Yungel, J. (2000) : Greenland Ice Sheet: High-Elevation Balance and Peripheral Thinning. *Science*, 289(5478), 428-430.
- Kraus, K. and Pfeifer, N. (2001) : Advanced DTM generation from LIDAR data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV-3/W4 (Annapolis, MD, 22-24 Oct.)*, 23-30.
- 京都大学で環境学を考える研究者たち編 (2014) : 環境学－21 世紀の教養－. 朝倉書店, 137p.
- Lanari, R., Fornaro, G., Riccio, D., Migliaccio, M., Papathanassiou, K. P., Moreira, J. R.,

- Schwäbisch, M., Durta, L., Puglisi, G., Franceschetti, G. and Coltelli, M. (1996) : Generation of Digital Elevation Models by Using SIR-C/X-SAR Multifrequency Two-Pass Interferometry : The Etna Case Study, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34-5, 1097-1114.
- Lanari, R., Lundgren, P. and Snasosti, E. (1998) : Dynamic deformation of Etna Volcano observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 25-10, 1541-1544.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A. and Harding, D. (1999) : Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70-3, 339-361.
- Leva, D., Nico, G., Tarchi, D., Fortuny-Guasch, J. and Sieber, A. J. (2003) : Temporal analysis of a landslide by means of ground-based SAR Interferometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41-4, 745-752.
- Ley, R. G. (1988) : Some aspects of height extraction from SPOT imagery. *Photogrammetric Record*, 12, 823-832.
- Li, F. K. and Goldstein, R. M. (1990) : Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28-1, 88-97.
- Li, R. (1997) : Mobile mapping: an emerging technology for spatial data acquisition. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63-9, 1085-1092.
- 林舟・小口高 (2002) : 地形学における写真測量法の応用－欧米の事例を中心に－. *地学雑誌*, 111-1, 1-15.
- Link, L. E. (1969) : Capability of airborne laser profilometer system to measure terrain roughness. In: *Proceedings 6th Symposium. Remote Sensing Environment*, Ann Arbor, Michigan, 189-96.
- リュウ・ウエン・山崎文雄・松岡昌志・野中崇志・笹川正 (2014) : TerraSAR-X 強度画像を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震における 3 次元地殻変動の検出. *日本リモートセンシング学会誌*, 34-3, 166-176.
- Lohani, B. and Mason, D. C. (2001) : Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56, 100-120.
- Lohmann, P., Picht, G., Weidenhammer, J., Jacobsen, K. and Skog, L. (1988) : The design and implementation of a digital photogrammetric stereo-workstation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume XXVII-2/W2 (Kyoto, Japan, 1-10 July.), 155-164.
- Madsen, S. N., Zebker, H. A. and Martin, J. (1993) : Topographic Mapping Using Radar Interferometry : Processing Techniques, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*

- Sensing, 31-1, 246-256.
- 丸安隆和 (1965) : 写真判読による地すべり, 崩壊の統計的研究. 土木学会論文集, 116, 37-55.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T. (1993) : The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364, 138-142.
- 松英恵吾・伊藤拓弥・内藤健司 (2006) : 航空機 LiDAR による森林資源量推定—密度の異なるスギ・ヒノキの林分パラメータ推定—. 写真測量とリモートセンシング, 45-1, 4-13.
- Mazzanti, P., Bozzano, F., Cipriani, I. and Prestininzi, A. (2015) : New insights into the temporal prediction of landslides by a terrestrial SAR interferometry monitoring case study. *Landslides*, 12-1, 55-68.
- Meigs, A. (2013) : Active tectonics and the LiDAR revolution. *Lithosphere*, 5-2, 226-229.
- 満上育久 (2011) : 私の研究開発ツール Bundler Structure from Motion for Unordered Image Collections. 映像情報メディア学会誌, 65-4, 479-482.
- 宮城洋介・小澤拓・河野裕希 (2013) : DInSAR 及び GPS によって検出された霧島山・新燃岳 2011 年噴火に伴う地殻変動. *火山*, 58-2, 341-351.
- 宮澤圭・吉澤孝和 (1998) : 地すべり地の空中写真測量データの重みを考慮した 3 次元地下すべり面形状の推定. 写真測量とリモートセンシング, 37-6, 14-27.
- Mora, P., Baldi, P., Casula, G., Fabris, M., Ghirotti, M., Mazzini, E. and Pesci, A. (2003) : Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy). *Engineering Geology*, 68-1&2, 103-121.
- 森岡昇 (1984) : 集運材用ワイヤロープの支柱としての立木の強さ (Ⅲ) 横荷重による力のモーメントと幹の傾きの関係. 日本林学会誌, 66-4, 160-163.
- 森屋洋・羽沢大樹・阿部真郎・佐藤康彦 (2005) : 秋田県東成瀬地域の珪質泥岩層の地すべり. 日本地すべり学会誌, 42-1, 40-50.
- 村井俊治 (1987) : スポット HVR による地形計測. 写真測量とリモートセンシング, 26—特集号 1, 2-10.
- 村井俊治・奥田勉・中村秀至 (1981) : 非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究. 東京大学生産技術研究所報告, 29-6, 1-15.
- 村井俊治・鈴木真 (1982) : バンドル法による空中三角測量の精度に関する研究. 写真測量とリモートセンシング, 21-2, 26-31.
- 村井俊治・安岡善文 (2000) : 地球観測と宇宙産業. 生産研究, 52-3, 168-172.
- 村木広和・下村博之 (2012) : リモートセンシング技術の地盤工学への応用 4. 合成開口レーダーの概要と応用例 (1). 地盤工学会誌, 60-6, 37-48.
- 村田稔 (1994) : インターフェロメトリック SAR による 3 次元計測. 写真測量とリモートセンシング, 33-5, 26-29.

- 武藤章 (1965) : 秋田県南部地域の新第三系の層序. 地質学雑誌, 71, 389-400.
- Næsset E. (1997a) : Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52-2, 49-56.
- Næsset E. (1997b) : Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 61-2, 246-253.
- Næsset, E. (2002) : Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80-1, 88-99.
- Næsset E. (2004) : Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19-2, 164-179.
- Næsset, E. and Bjercknes, K.-O. (2001) : Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 78-3, 328-340.
- 長井正彦・柴崎亮介 (2009) : センサ統合による UAV 搭載マッピングシステム. 写真測量とリモートセンシング, 48-5, 260-265.
- 中島紫寿香 (2012) : 陸・海・空からの防災・減災支援. 建設の施工企画, '12-9, 69-71.
- 中村慶三郎 (1932) : 山崩れと降水量並びにその時間的分布. 地理学評論, 8-7, 586-602.
- 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, DVD-ROM 2 枚・付図 1 葉, 60p.
- 中田高・隈元崇・奥村晃史・後藤秀昭・熊原康博・野原壯・里優・岩永昇二 (2008) : 空中レーザー計測による活断層変位地形の把握と変位量復元の試み. 活断層研究, 29, 1-13.
- 奈良間千之 (2015) : ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた新潟県の山地・丘陵における地すべり性地表変動のモニタリングに関する研究. 一般財団法人日本建設情報総合センター研究助成事業報告書 (助成番号 第 2015-12 号), 21p.
- 縄村達矢・遠藤貴宏・安岡善文 (2007) : スギ人工林における LiDAR を用いた樹木抽出の最適観測密度に関する考察. 生産研究, 59-3, 329-331.
- Nelson, R., Krabill, W. and MacLean, G. (1984) : Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, 15-3, 201-212.
- Nelson, R., Krabill, W. and Tonelli, J. (1988) : Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote sensing of environment*, 24-2, 247-267.
- 新潟県 (2007) : これからの森林づくり (中越計画区地域森林計画書). 146p.
- Nissen, E., Krishnan, A. K., Arrowsmith, J. R. and Saripalli, S. (2012) : Three-dimensional surface displacements and rotations from differencing pre- and post-earthquake LiDAR point clouds. *Geophysical Research Letters*, 39-16, doi:10.1029/2012GL052460.
- 野中崇志・朝香智仁・岩下圭之 (2016) : 衛星搭載合成開口レーダ TerraSAR-X による高精細 DEM の概要. 日本大学生産工学部第 49 回学術講演会講演概要 (2016 年 12 月 3 日), 6-16,

605-606.

- 小花和宏之・早川裕弐・齋藤仁・ゴメス クリストファー (2014) : UAV-SfM 手法と地上レーザー測量により得られた DSM の比較. 写真測量とリモートセンシング, 53-2, 67-74.
- Oguchi, T., Wasklewicz, T. and Hayakawa, Y. S. (2013) : Remote Data in Fluvial Geomorphology : Characteristics and Applications. *Treatise on Geomorphology*, 9, 711-729.
- 岡重文 (1964a) : 山形県新庄市西方山地の地すべり地形について. 写真測量, 3-2, 70-79.
- 岡重文 (1964b) : 北信地すべり群の写真判読について. 地すべり, 1-2, 19-28.
- 岡谷隆基 (2008) : 「だいち」による地形図修正について, 地図中心, 427, 10-13.
- 岡谷隆基・小荒井衛 (2011a) : 井戸沢断層に沿って出現した地表地震断層に対する地上 3 次元レーザースカナー計測. 写真測量とリモートセンシング, 50-5, 296-301.
- 岡谷隆基・小荒井衛 (2011b) : Mobile Mapping System による津波浸水高の計測 (第一報). <http://www.gsi.go.jp/common/000061399.pdf> (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 岡谷隆基・小荒井衛・茂木公一・渡辺信之・山田陽子・松尾馨 (2001) : 航空機 SAR を用いた急峻地形地における DEM の抽出とその応用. 40-4, 4-13.
- Okatani, T., Koarai, M., Moteki, K., Watanabe, N., Yamada, Y., Matsuo, K. and Nakagawa, K. (1999b) : Development of the Technology of Making a DEM Using Airborne Synthetic Aperture Radar (SAR) . *Proceedings on The 20th Asian Conference on Remote Sensing, ARS99-3 (22-25, November, Hong Kong, China)*.
- 岡谷隆基・小荒井衛・中埜貴元 (2013a) : 津波被害を車で把握 - 360 度撮影. 画像ラボ, 2013 年 11 月号, 33-38.
- 岡谷隆基・小荒井衛・中埜貴元 (2016) : MMS を用いた津波浸水深判読の有用性の検証. 地図, 54-2, 17-27.
- Okatani, T., Koarai, M. and Watanabe, N. (2000) : Mapping Mt. Tsukuba from SAR Imagery - DEMs from SAR Imagery Using Stereo Matching Techniques -. *Geomatics Information Magazine (GIM)*, 14-10, 34-37.
- Okatani, T., Maruyama, H., Sasaki, H., Yaguchi, H., Nagayama, T., Kayaba, S., Abe, M. and Kishimoto, N. (2006) : Progress of Global Mapping Project since Johannesburg Summit in 2002. *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 53, 7-16.
- 岡谷隆基・村木広和 (2012) : リモートセンシング技術の地盤工学への応用 4. 合成開口レーダーの概要と応用例 (2). 地盤工学会誌, 60-7, 44-48.
- 岡谷隆基・乙井康成・中埜貴元・小荒井衛 (2013b) : 新潟県出雲崎地区における航空レーザー計測データによる森林の 3 次元要素の抽出. 写真測量とリモートセンシング, 52-2, 56-68.
- 岡谷隆基・乙井康成・中埜貴元・小荒井衛 (2013c) : 航空レーザー計測データより導出される樹高・樹木密度と斜面崩壊との関係. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会 (幕張メッセ), HDS27-P01.

- 岡谷隆基・佐藤浩・中埜貴元・小荒井衛（2012）：ALOS/PALSAR 干渉画像による秋田県東成瀬地区地すべりのモニタリング．写真測量とリモートセンシング，51-2，95-102.
- Okatani, T., Watanabe, N. and Koarai, M. (1999a) : Development of the Technology of Making a High-Accuracy DEM using RADARSAT High-Resolution Data. Proceedings on The 20th Asian Conference on Remote Sensing, MSP99-1 (22-25, November, Hong Kong, China).
- 大木章一・村上亮・渡辺信之・浦部ぼくろう・宮脇正典（2005）：航空機搭載型合成開口レーダー（SAR）観測による浅間火山 2004 年噴火に伴う火口内の地形変化．火山，50，401-410.
- 大政謙次・秋山幸秀・石神靖弘・吉見健司（2000）：ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムによる樹冠高の 3 次元リモートセンシング．日本リモートセンシング学会誌，20-4，34-46.
- 大森博雄・大澤雅彦・熊谷洋一・梶幹男編（2005）：自然環境の評価と育成．東京大学出版会，288p.
- 小野塚良三（1998）：林冠ギャップに着目した写真判読とデジタル空中写真測量システムによる八幡平澄川地すべり土塊の変位量計測．地すべり，35-2，69-76.
- Open Topography Facility（2017）：Open Topography. <http://www.opentopography.org/>（最終閲覧日：2017.03.01）
- 小山内信智・桂真也・富田陽子・小川紀一郎・中田慎（2011）：森林の崩壊抑制効果を反映した生産土砂量の推定に向けた一考察 —豪雨災害時の崩壊面積率の解析—. 砂防学会誌，63-5，22-32.
- Peltzer, G. and Rosen, P. (1995) : Surface Displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, Earthquake Observed by SAR Interferometry. Science, 268-5215, 1333-1336.
- Pitkänen, J., Maltamo, M., Hyyppä, J. and Yu, X. (2004) : Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI-8/W2, 187.191.
- Powers, P. S., Chiarle, M. and Savage, W. Z. (1996) : A digital photogrammetric method for measuring horizontal surficial movements on the Slumgullion earthflow, Hinsdale County, Colorado. Computers & Geosciences, 22-6, 651-663.
- Rabus, B., Eineder, M., Roth, A. and Balmer, R. (2003) : The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57-4, 241-262.
- RADARSAT International (2000) : “RADARSAT Data Products Specifications”, RADARSAT International, RSI-GS-026 ver. 3/0, 125p.
- Rao, T. C. M., Rao, K. V., Kumar, A. R., Rao, D. P. and Deekshatula, B. L. (1996) : Digital terrain model (DTM) from Indian Remote Sensing (IRS) satellite data from the overlap

- area of two adjacent paths using digital photogrammetric techniques. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62, 727-731.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Zebker, H. A., Webb, F. H. and Fielding, E. J. (1996) : Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 101-E10, 23109-23125.
- Rowland, S., MacKay, M. E. and Mougini-Mark, P. J. (1999) : Topographic analyses of Kilauea Volcano, Hawai'i, from interferometric airborne radar. *Bulletin of Volcanology*, 61-1&2, 1-14.
- 砂防学会編 (2004) : 「改訂 砂防用語集」, 山海堂, 432p.
- 斎藤英二・丸山正・吉見雅行・林田拓己 (2011) : 写真測量を用いた地表断面の三次元表現の試み. 独立行政法人産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター
<https://unit.aist.go.jp/iev/report/jishin/tohoku/report/idosawa/sokuryou.html>
 (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 斎藤和也 (1995) : 砂防におけるリモートセンシング技術の活用 3. リモートセンシングと GIS の活用. *砂防学会誌*, 48-2, 35-45.
- 斎藤和也・沼田洋一・島村秀樹・朱林・赤松幸生・中山裕則・宮崎早苗 (2009) : 大規模災害におけるリモートセンシング技術活用事例の調査. *生産研究*, 61-4, 773-779.
- Salgueiro, P. R. (1965) : Landslide investigation by means of photogrammetry. *Photogrammetria*, 20-3, 107-114.
- Samsonov, S. and d'Oreye, N. (2012) : Multidimensional time-series analysis of ground deformation from multiple InSAR data sets applied to Virunga Volcanic Province. *Geophysical Journal International*, 191-3, 1095-1108.
- 笹原克夫・土志田正二・江藤史哉 (2012) : 航空レーザ計測による斜面崩壊の前兆としての微地形の抽出. *Journal of the Japan Landslide Society*, 49-3, 141-145.
- 佐藤創 (2006) : 表層崩壊と森林. *森林科学*, 47, 22-27.
- 佐藤比呂志・嶋本利彦・堤昭人・川本英子・宮脇昌弘 (1994) : 1993年北海道南西沖地震と1983年日本海中部地震に伴う陸上の津波堆積物. *活断層研究*, 12, 1-23.
- 佐藤浩・小荒井衛・江田敏幸・伊藤麻子 (2008) : 新宿御苑における航空レーザ測量データを用いた樹林の葉面積指数 (LAI) のマッピング. *写真測量とリモートセンシング*, 47-3, 37-47.
- 佐藤浩・小荒井衛・加藤悟・牧田肇・八木浩司 (2006) : 白神山地・ニッ森北麓における航空レーザ測量データと毎木調査結果の比較. *国土地理院時報*, 110, 101-117.
- 佐藤浩・小荒井衛・飛田幹男・鈴木啓・雨貝知美・関口辰夫・矢来博司 (2010a) : 地すべり性地表変動に関する SAR 干渉画像判読カードの提案. *国土地理院時報*, 120, 9-15.
- 佐藤浩・小荒井衛・宇根寛・八木浩司・牧田肇 (2010b) : 航空レーザ測量データ及びハイパースペクトルセンサデータを用いた白神山地・泊の平地区における地生態学図の作成. *地理学評論*, 83-6, 638-649.

- 佐藤浩・岡谷隆基・小荒井衛・鈴木啓・飛田幹男・矢来博司・関口辰夫 (2012) : SAR 干渉画像を用いた地すべり地表変動の検出について—山形県月山周辺を事例にして—. 地すべり学会誌, 49-2, 61-67.
- 澤田義人・沖一雄・遠藤貴宏・沢田治雄 (2013) : MODIS データを利用した広域洪水自動監視システムの開発. 生産研究, 65-4, 517-527.
- Schenk, T. and Toth, C. (1997) : Conceptual framework for a generalised roaming scheme. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63, 959-964.
- 瀬戸島政博・赤松幸生・船橋学・今井靖晃・天野正博 (2002a) : 航空機レーザスキャナによる森林域の計測とその適用性. 写真測量とリモートセンシング, 41-2, 15-26.
- 瀬戸島政博・今井靖晃・船橋学・岡崎亮太・天野正博 (2002b) : 落葉前後の航空機レーザスキャナデータを用いた里山の樹高計測と落葉広葉樹の林分把握に関する基礎的検討. ランドスケープ研究, 66-5, 503-508.
- 島崎彦人 (2005) : 衛星リモートセンシングによる地球環境観測. 国立環境研究所ニュース, 24-4, 11-13.
- 清水孝一・山越隆雄・小山内信智・福嶋彩・三尾有年 (2005) : 合成開口レーダの差分干渉処理技術による地すべり地検知の可能性について. 地すべり学会誌, 42-4, 312-317.
- 下野隆洋・南秀和・西井康郎・大野裕幸・渡部金一郎 (2011) : 航空機 SAR による霧島山 (新燃岳) の火口地形観測. 国土地理院時報, 121, 189-194.
- 品川俊介・阿南修司・佐々木靖人・向山栄・本間信一・小林容子 (2013) : 2 時期の航空レーザー測量による地表地震断層周辺の変位量分布の推定 —2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震に伴う事例—. 応用地質, 53-6, 271-281.
- Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K. and Kira T. (1964) : A Quantitative Analysis of Plant Form—The Pipe Model Theory : II. Further Evidence of the Theory and its Application in Forest Ecology. 日本生態学会誌, 14-4, 133-139.
- Simard, M., Zhang, K., Rivera-Monroy, V. H., Ross, M. S., Ruiz, P. L., Castañeda-Moya, E., Twilley, R. R. and Rodriguez, E. (2006) : Mapping height and biomass of mangrove forests in Everglades National Park with SRTM elevation data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72-3, 299-311.
- Singhroy, V., Matter, K. E. and Gray, A. L. (1998) : Landslide characterization in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images. *Advances in Space Research*, 21-3, 465-476.
- Smith, M.J., Smith, D.G., Tragheim, D.G. and Holt, M. (1997) : DEMs and ortho-images from aerial photographs. *Photogrammetric Record*, 15-90, 945-950.
- 測量用語辞典編集委員会編 (2011) : 測量用語事典. 東洋書店, 393p.
- Squarzoni, C., Delacourt, C. and Allemand, P. (2003) : Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology*,

- 68-1&2, 53-66.
- Strozzi, T., Farina, P., Corsini, A., Ambrosi, C., Thüring, M., Zilger, J., Wiesmann, A., Wegmüller, U. and Werner, C. (2005) : Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 2-3, 193-201.
- Strozzi, T., Luckman, A., Murray, T., Wegmüller, U. and Werner, C. L. (2002) : Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *Geoscience and Remote Sensing*, 40-11, 2384-2391.
- 杉村俊郎・田中總太郎 (1998) : RADARSAT ステレオ SAR による高度測定. *RESTEC*, 42, 14-16.
- 鈴木啓・雨貝知美・森下遊・佐藤浩・小荒井衛・関口辰夫 (2010) : 山形県月山周辺における SAR 干渉画像を用いた地すべりの検出. *国土地理院時報*, 120, 1-7.
- Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M. and Iwasaki, A. (2011) : Characteristics of ASTER GDEM version 2. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 3657-3660
- 高井敦史・保高徹生・遠藤和人・勝見武 (2013) : 東日本大震災における津波堆積物の分布特性と物理化学特性. *地盤工学ジャーナル*, 8-3, 391-402.
- 武内和彦・住明正・植田和弘 (2002) : 環境学序説. *環境学入門 (1)*, 岩波書店, 190p.
- 田村正行・高槻幸枝 (2000) : 航空機レーザースキャナによる樹高計測. *写真測量とリモートセンシング*, 39-2, 8-13.
- 棚橋有三 (1993) : デジタルフォトグラメトリックワークステーション. *写真測量とリモートセンシング*, 32-6, 63-66.
- Tansey, K., Selmes, N., Anstee, A., Tate, N. J. and Denniss, A. (2009) : Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 30-19, 5195-5209.
- Tarchi, D., Casagli, N., Fanti, R., Leva, D. D., Luzi, G., Pasuto, A., Pieraccini, M. and Silvano, S. (2003) : Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. *Engineering Geology*, 68-1&2, 15-30.
- Tateishi, R. and Akutsu, A. (1992) : Relative DEM production from SPOT data without GCP. *International Journal of Remote Sensing*, 13-14, 2517-2530.
- Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N. and Genevois, R. (2007) : Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement; a new approach. *International Journal of Remote Sensing*, 28-15&16, 3425-3446.
- Theodossiou, E.I. and Dowman, I.J. (1990) : Heighting accuracy of SPOT. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56, 1643-1649.
- Thoma, D. P., Gupta, S. C., Bauer, M. E. and Kirchoff, C. E. (2005) : Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment. *Remote Sensing of Environment*, 95-4, 493-501.

- 飛田幹男・藤原智・村上亮・中川弘之・Rosen, P. A. (1999) : 干渉 SAR のための高精度画像マッチング. 測地学会誌, 297-314.
- 飛田幹男・神谷泉・中埜貴元・岩橋純子・大角光司・高桑紀之 (2014) : 無人機による西之島地形計測の高精度化. 国土地理院時報, 125, 145-154.
- 飛田幹男・村上亮・中川弘之・矢来博司・藤原智 (2001) : SAR 画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動, 変動速度, 体積変化. 国土地理院時報, 95, 37-48.
- 東樋口護 (2015) : 地球環境学入門. 丸善出版, 186p.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2012) : 東北地方太平洋沖地震津波情報.
<http://www.coastal.jp/ttjt/> (最終閲覧日 : 2017.03.01).
- 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学研究系編 (2011) : 自然環境学の創る世界. 朝倉書店, 216p.
- 東京大学地震研究所 (2011) : 2011 年 4 月 11 日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層について, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/PREV_HP/outreach/eqvolc/201103_tohoku/fukushimahamadoori/ (最終閲覧日 : 2017.03.01).
- Tonkin, T. N., Midgley, N. G., Graham, D. J. and Labadz, J. C. (2014) : The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. *Geomorphology*, 226, 35-43.
- Torlegård, K. (1986) : Some photogrammetric experiments with digital image processing. *Photogrammetric Record*, 12-68, 175-196.
- Torlegård, K. (1988) : Transference of methods from analytical to digital photogrammetry. *Photogrammetria*, 42-6, 197-208.
- Toutin, T. (1995) : Generating DEM from stereo images with a photogrammetric approach: Examples with VIR and SAR data. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 110-117.
- Toutin, T. (1996) : Opposite side ERS-1 SAR stereo mapping over rolling topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34-2, 543-549.
- Toutin, T. and Gray, L. (2000) : State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 55, 13-33.
- Travelletti, J., Malet, J.-P. and Delacourt, C. (2014) : Image-based correlation of Laser Scanning point cloud time series for landslide monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32, 1-18.
- 打萩珠男 (1968) : 航空写真による地すべり状況の測定. *地すべり*, 5-2, 27-33.
- 打萩珠男 (1970) : 航空写真による地すべり移動測量. *地すべり*, 7-2, 32.
- 内山庄一郎・井上公・鈴木比奈子 (2014a) : SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. *防災科学技術研究所研究報告*, 81, 37-60.
- 内山庄一郎・中田高・井上公・熊原康博・杉田暁・井筒潤・後藤秀昭・福井弘道・鈴木比奈子・

- 谷口薫 (2014b) : 小型 UAV と SfM ソフトウェアを用いた断層変位地形把握の試み ―根尾谷断層水鳥断層崖を例に―. 活断層研究, 40, 35-42.
- 宇宙航空研究開発機構 (1997) : Pi-SAR について. http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/Pi-SAR/about_pisar.html (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 宇宙航空研究開発機構 (2003) : リモートセンシング基礎講座ーリモートセンシングのしくみ. http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/experience/rm_kiso/mecha_sensortype.html (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 宇宙航空研究開発機構 (2014) : 陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」
<http://www.jaxa.jp/projects/pr/brochure/pdf/04/sat29.pdf> (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 宇宙航空研究開発機構宇宙利用ミッション本部 (2012) : 陸域観測技術衛星「だいち」(ALOS) プロジェクトに係る事後評価について.
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2012/04/17/1319403_02.pdf (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター (2016) : 基本観測シナリオ 第二版 初版.
http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/obs/scenario/ALOS-2_Basic_Observation_Scenario_2nd-Ed_J_v00.pdf (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 宇根寛・佐藤浩・矢来博司・飛田幹男 (2008) : SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析. *Landslides – Journal of the Japan Landslide Society*, 45-2, 125-131.
- UNOCHA (2015) : reliefweb. <http://reliefweb.int/> (最終閲覧日 : 2017.03.01) .
- Urabe, B., Watanabe, N. and Murakami, M. (2006) : Topographic Change of the Summit Crater of Asama Volcano during the 2004 Eruption Derived from Airborne Synthetic Aperture Radar (SAR) Measurements. *Bulletin of Geographical Survey Institute*, 53, 1-6.
- 浦塚清峰 (2015) : 航空機搭載合成開口レーダについて.
http://www.soumu.go.jp/main_content/000365210.pdf (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- USGS (1999) : GTOPO30 Documentation. <http://webgis.wr.usgs.gov/globalgis/gtopo30/gtopo30.htm> (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- USGS (2010) : Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) .
http://topotools.cr.usgs.gov/gmted_viewer/ (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- USGS (2013) : LANDSAT Project Factsheet.
<http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3072/fs2012-3072.pdf> (最終閲覧日 : 2017.03.01)
- 白田雅郎・村山進・岡本金一・白石建雄・高安泰助・乗窟一雄・狐崎長狼・山脇康平 (1981) : 5 万分の 1 秋田県総合地質図幅「稲庭」同説明書, 秋田県.
- Waldron, L. J. (1977) : The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of America Journal*, 41-5, 843-849.
- Walker, A. S. (1995) : Analogue, analytical and digital photogrammetric workstations:

- Practical investigations of performance. *Photogrammetric Record*, 15-85, 17-25.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. and Reynolds, J. M. (2012) : 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.
- Wilkinson, M., McCaffrey, K. J. W., Roberts, G., Cowie, P. A., Phillips, R. J., Michetti, A. M., Vittori, E., Guerrieri, L., Blumetti, A. M., Bubeck, A., Yates, A. and Sileo, G. (2010) : Partitioned postseismic deformation associated with the 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake surface rupture measured using a terrestrial laser scanner. *Geophysical Research Letters*, 37-10, 1-7.
- Wrobel, B. P. (1991) : The evolution of digital photogrammetry from analytical photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 13-77, 765-776.
- 八木浩司・檜垣大助・吉松弘行・相良渉・高木洋一・内山庄一郎 (2003) : 空中レーザー高精度地形図の地すべり・微地形判読への応用. *地すべり*, 39-4, 421-427.
- Yalcin, A. and Bulut, F. (2007) : Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey). *Natural Hazards*, 41-1, 201-226.
- 山本義幸・森田匡俊 (2013) : リモートセンシングデータの防災に関わる検出レベルの検証. 愛知工業大学地域防災研究センター年次報告書, 9, 12-15.
- 山野芳樹 (2000) : モービルマッピングシステムによる道路空間データ収集手法の開発. *APA*, 77-1, 1-10.
- 山之口勤 (2013) : 氷河・氷床環境変動監視のための SAR データの利用. *SAR 研究の新時代に向けて*, 2-4. <http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/173600/1/2-4-yamanokuchi.pdf> (最終閲覧日: 2017.03.01)
- 山科真一・広瀬伸二・龍見栄臣・鈴木亘・江坂文寿・三浦順 (2011) : 荒戸沢地すべりでのレーザープロファイラの活用事例について—災害発生時の迅速な現地調査から対策工計画策定まで—. *地すべり学会誌*, 48-2, 107-112.
- 山崎文雄 (2009) : 防災におけるリモートセンシング技術利用の最新動向. *土木学会 第10回地震災害マネジメントセミナー*, 12p.
- 柳辰平 (1972) : 戦後の民間写真測量業界の歩み. *写真測量*, 11-Special, 97-101.
- 矢来博司 (2007) : 衛星干渉 SAR による火山地域の地殻変動の面的把握に関する研究 (第3年次). *国土地理院平成18年度調査研究年報*, 2p.
- 吉見雅行・丸山正・遠田晋次・金田平太郎・粟田泰夫・安藤亮輔・吉岡敏和 (2008) : 2008年岩手・宮城内陸地震の緊急調査報告. *AFRC News*, 81, 5-12.
- 吉澤孝和・丸山昌義・長尾勲・村瀬孝三・西澤茂高・三澤敏雄・根岸六郎 (1991) : 空中写真測量による地すべり情報の提供とすべり面の解析. *地すべり*, 27-4, 9-17.
- 吉澤孝和・酒井輝雄・宮野尾文夫・根岸六郎・関貴幸 (1994) : 空中写真測量による地下すべり

- 面形状解析システム. 写真測量とリモートセンシング, 33-3, 17-32.
- 雪下勝典・岡谷隆基 (2009) : 画像情報整備における衛星画像の活用について. 国土地理院時報, 119, 111-120.
- Zebker, H. A. and Goldstein, R. M. (1986) : Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 91-B5, 4993-4999.
- Zebker, H. A., Madsen, S. N., Martin, J., Wheeler, K. B., Miller, T., Lou, Y., Alberti, G., Vetrella, S. and Cucci, A. (1992) : The TOPSAR interferometric radar topographic mapping instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30-5, 933-940.
- Zebker, H.A., Werner, C.L., Rosen, P.A. and Hensley, S. (1994) : Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32-4, 823-836.
- 趙卉菁・柴崎亮介 (2000) : 地上据え置き型レーザレンジスキャナーを利用した 3 次元都市空間データの自動構築手法に関する研究. 写真測量とリモートセンシング, 39-2, 52-63.