

鹿児島大学大学院人文社会科学研究科

博士学位論文

桜島火山における二酸化硫黄高濃度事象と  
近赤外衛星画像を用いた火山防災教育研究

Studies on volcanic disaster prevention education using near-infrared satellite  
images and high concentration events of sulfur dioxide around Sakurajima volcano

2014年

(申請者)

坂 本 昌 弥

Masaya SAKAMOTO

鹿児島大学大学院人文社会科学研究科 博士学位論文

桜島火山における二酸化硫黄高濃度事象と近赤外衛星画像を用いた  
火山防災教育研究

坂本昌弥

目 次

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1      | 研究の目的と方法  |    |
| 1.1.   | 問題の所在と研究目的  | 1  |
| 1.2.   | 方法  | 3  |
| 1.3.   | 桜島火山における火山ガスとその防災教育研究史                            | 4  |
| 1.4.   | 近赤外衛星画像とそれを用いた火山地形教育の研究史                          | 8  |
| 1.5.   | 本論文の構成  | 9  |
| 2      | 使用データ   |    |
| 2.1.   | 火山ガスデータ   | 11 |
| 2.2.   | 浮遊粒子状物質データ  | 12 |
| 2.3.   | 降灰量データ  | 12 |
| 2.4.   | 相関係数について  | 12 |
| 2.5.   | 高層気象観測データ   | 13 |
| 2.6.   | 衛星画像データ   | 13 |
| 3      | 桜島火山ガスの実態とその防災教育の必要性                              |    |
| 3.1.   | 2001年- 2012年の桜島火山ガス高濃度事象                          | 16 |
| 3.1.1. | 各測定局における2001年- 2012年のSO <sub>2</sub> およびSPM量高濃度事象 | 16 |
| 3.1.2. | 桜島火山SO <sub>2</sub> ガス高濃度事象の特徴                    | 19 |
| 3.1.3. | 有村局におけるSO <sub>2</sub> ガスとSPM量の高濃度事象              | 20 |
| 3.1.4. | 赤水局とその周辺におけるSO <sub>2</sub> ガスとSPM量の高濃度事象         | 25 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 3.1.5.  | 黒神局におけるSO <sub>2</sub> ガスとSPM量の高濃度事象.....  | 31 |
| 3.1.6.  | 桜島支局におけるSO <sub>2</sub> ガスとSPM量の高濃度事象..... | 35 |
| 3.1.7.  | 桜島火山のSO <sub>2</sub> ガスの島外移流.....          | 36 |
| 3.2.    | 本章の考察とまとめ.....                             | 37 |
| <br>    |  |    |
| 4       | 人工衛星画像を用いた火山地形判読と教育利用                      |    |
| 4.1.    | 火山地形学習教材に用いる衛星画像.....                      | 41 |
| 4.1.1.  | 学習教材としての地形表示画像.....                        | 41 |
| 4.1.2.  | 教育用衛星画像表示システムSiPSEと近赤外衛星画像.....            | 41 |
| 4.2.    | 衛星画像とその立体表示による火山地形の検討.....                 | 43 |
| 4.2.1.  | 九州の地形と火山分布の概観.....                         | 43 |
| 4.2.2.  | 両子山火山群.....                                | 46 |
| 4.2.3.  | 鶴見・由布火山群と九重火山群.....                        | 47 |
| 4.2.4.  | 阿蘇カルデラと阿蘇火山群.....                          | 50 |
| 4.2.5.  | 多良岳火山群.....                                | 53 |
| 4.2.6.  | 雲仙火山.....                                  | 53 |
| 4.2.7.  | 加久藤・小林カルデラと霧島火山群.....                      | 56 |
| 4.2.8.  | 始良カルデラと桜島火山.....                           | 58 |
| 4.2.9.  | 阿多カルデラと指宿火山群.....                          | 61 |
| 4.2.10. | 諏訪之瀬島火山.....                               | 63 |
| 4.2.11. | 箱根火山.....                                  | 65 |
| 4.2.12. | 伊豆大島.....                                  | 67 |
| 4.3.    | 本章の考察とまとめ.....                             | 68 |
| <br>    |  |    |
| 5       | 火山防災教育の実践                                  |    |
| 5.1.    | 火山防災に関する高校生の実態.....                        | 70 |
| 5.1.1.  | 火山ガス防災の現状とその教育に必要な条件.....                  | 70 |
| 5.1.2.  | 高等学校における火山防災教育.....                        | 71 |

|          |                                     |     |
|----------|-------------------------------------|-----|
| 5.1.3.   | 火山防災用語に関するアンケートとその結果                | 72  |
| 5.2.     | 桜島火山防災マップの評価とその防災教育                 | 78  |
| 5.2.1.   | 桜島火山活動を取り巻く社会の現状                    | 78  |
| 5.2.2.   | 桜島火山防災マップの作成の経緯                     | 80  |
| 5.2.3.   | 桜島火山防災マップの評価と問題点                    | 82  |
| 5.3.     | 桜島火山に対する防災教育                        | 87  |
| 5.3.1.   | 防災授業のデザイン                           | 87  |
| 5.3.2.   | 人工衛星画像と火山防災マップを活用した授業実践             | 89  |
| 5.3.2.1. | 学習の位置づけとねらい                         | 89  |
| 5.3.2.2. | 実践授業Ⅰの成果                            | 91  |
| 5.3.2.3. | 実践授業Ⅱの成果                            | 94  |
| 5.3.2.4. | 人工衛星画像と火山防災マップを活用した授業実践の考察          | 96  |
| 5.3.3.   | 桜島火山SO <sub>2</sub> ガス濃度変化を活用した授業実践 | 98  |
| 5.3.3.1. | 火山ガス学習の必要性和ねらい                      | 98  |
| 5.3.3.2. | 実践授業Ⅲの成果                            | 98  |
| 5.3.3.3. | 実践授業Ⅳの方法と教材                         | 99  |
| 5.3.3.4. | 火山ガス実践授業の結果と考察                      | 104 |
| 5.4.     | 本章の考察とまとめ                           | 107 |
|          |                                     |     |
| 6        | 結 論                                 |     |
| 6.1.     | 本研究の総括                              | 109 |
| 6.2.     | 火山防災システムの構築                         | 111 |
|          |                                     |     |
|          | 謝 辞                                 | 114 |
|          |                                     |     |
|          | 引用文献                                | 116 |

## 第1章 研究の目的と方法

### 1.1. 問題の所在と研究目的

世界の約10%の活火山が日本列島に存在する。そしてそのうち、活動的な火山の近隣地域に市民が居住している場合も珍しくない。このことは火山災害から地域住民の生命・財産を保全する防災対策は、地震や台風によってもたらされる自然災害に対するそれと同じように、常に取り組みなければならないことを示している。建築学や土木工学等の工学的な面から火山災害に関する防災対策を見ると、火山学や応用地質学などの自然科学研究から得られた知見を取り入れ、さまざまな問題を抱えながらも行政等の主導によって計画的に推進されている。しかし公的な学校教育や市民学習等における火山防災学習において、児童・生徒や地域住民がこの災害に向き合うために必要な能力（火山防災リテラシー）の育成・向上を目指した実践的教育活動は、いくつかの積極的・先進的な例（例えば、小山，2006；坂本・木下，2009；霧島市教育委員会，2012）はあるもののほとんどおこなわれていないのが実情である。

火山災害は多様であるが、本研究では火山ガスと火山地形という性質の異なった火山現象を対象とする。火山ガスによる現象は、短時間に変化し、「動的な現象」であるのに対し、火山地形は噴火現象によって形成された「静的な現象」である。これらの二つの現象を対象として、本研究では火山災害にかかわる以下のような諸問題を明らかにする。

① 桜島火山や三宅島雄山は、火山ガス濃度を測定する測定局が数多く設置されている。そのため本研究ではこの豊富なデータを用いて桜島火山の火山ガス高濃度事象を研究対象として扱う。桜島火山は2009年以降、大気中に放出される環境基準を超える二酸化硫黄ガス（以下；SO<sub>2</sub>ガス）高濃度事象は増加傾向にある（坂本・木下，2014）。それゆえ行政や教育機関は火山ガス災害への理解・対応をすることが急務となる。しかしこれまでこの火山ガス災害に対する先行的な教育研究や教育普及活動例はほとんど存在しておらず、学校教育の中で重点的に取り扱われることも少ない。本研究の第一の目的は、火山から放出される環境基準を超えるSO<sub>2</sub>ガス高濃度事象の実態を明らかにし、その防災教育への適用について考察する。

② 動的な火山ガスの防災に対し、火山噴火の結果として存在する火山地形も防災教育を行う上で重要である。とりわけ、これまで火山地形に関する画像や写真を用いた研究は数多くなされているが（例えば、守屋，1978）、防災教育を実施するに当たっては、簡

便で利用しやすく、しかも実態を正確に把握できる方法が必要である。そうした方法として、近赤外衛星画像とその立体視画像による地形把握があり、これは有益な方法のひとつとして確立されてきた（例えば、木下ほか，2002，坂本，2013）。本研究では第二の目的として、この方法を用いて多様な火山地形が存在する九州の火山地形の把握をおこない、火山防災教育への適用を検討する。

③ 火山ガス防災や火山地形学習に関する研究をふまえ、第三の目的として気象と桜島火山ガスの高濃度事象の相関を活用した教材を作成し、この学習をすることによって自ら危険を予測し、それを回避する具体的な方法に関する教育実践をおこない、災害に直面した際の自己判断力の必要性・重要性を理解させる教育の在り方について考察する。

④ 図 1-1 に示すように、火山災害に対して平時には多様な防災対策をおこない、さらに災害時には避難に関する情報を提供し、避難に関する命令・指示を出す役割を担う行政等（以下；担い手）側と、災害が発生した際に被災し避難することになる地域住民（以下；受け手）側の「火山防災リテラシー」には大きな隔たりが存在する。国や地方自治体といった行政レベルにおいては、火山防災の必要性は理解され、それに伴って火山防災マップの作成とそれに基づいた避難訓練等の施策が実施されている。ここで作成された地域住民用の火山防災マップは、これまでのさまざまな火山研究の知見に基づき、必要とされる火山情報や避難に関するさまざまな情報が記載されているが、受け手側には火山災害に対する緊張感ある防災意識や、火山防災マップを活用するために必要なスキル、防災用語の正確な理解力、そして火山防災訓練等の経験の有無等において大きな問題が存在する（坂本・木下，2006）。



図 1-1 本研究で考察する火山防災教育における問題点の所在

桜井（2013）は、兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）の教訓から、この隔たりを埋める存在（以下；つなぎ手）の必要性を述べたが、火山災害に対する防災・減災においてもいかにこの隔たりを有機的に埋め、双方向の繋がりを強化していくかというところに問題と課題が介在している。第四の目的として、本研究ではこの担い手側と（高校生を学習者とした）受け手側の間に介在する諸問題を具体的に検討し、その解決方法について考察する。

東日本大震災を受けた防災教育・防災管理等に関する有識者会議（2012）は、その最終報告で「自ら危険を予測し、回避する」態度・能力の育成の必要性を述べている。そこで第五の目的として担い手と受け手の間に学校教育（つなぎ手）を位置づけ、野外学習ができづらい学校の教育環境の中で、担い手側が求める防災スキルを受け手側に効果的に伝え、防災に関する受け手側のスキル向上を目指した火山防災教育を構築し、その効果を検証し、さらに受け手側が持つ防災・減災に関する諸問題点を明らかにし、担い手側と受け手側を有機的に結ぶ存在としての学校教育の在り方について具体的考察をおこなう。

## 1.2. 方法

本研究では次の方法で研究目的にアプローチする。

- (1) これまで議論されることが少なかった桜島火山の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象による火山ガス災害について検証し、SO<sub>2</sub> ガス災害に対する防災教育の必要性とその教育実践について考察する。このため桜島火山から大気中に放出される SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象と気象の関係、および SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象と浮遊粒子状物質（Suspended Particulate Matter, 以下 SPM）や降灰量との相関を明らかにする。
- (2) 本研究では、火山地形を把握するために衛星画像を加工して作成した近赤外画像（Near Infrared Ray images, 以下 NIR 画像）及び近赤外立体視画像（以下 NIR 3D 画像）を用いる。この方法は簡便でしかも詳細に火山地形を把握できることから、火山防災マップとその防災用語に関する生徒のスキル向上に必要な教材、すなわち火山防災教育の教材として有効である。これを用いて主に九州の活火山が持つ地形を概観し、これを実践教育の中で取り入れ、その教育効果を検証する。
- (3) 火山防災マップに関する高校生の理解度をアンケート法を用いて調査する。そしてこの調査結果を踏まえて、火山地形学習及び火山ガス防災学習も含めた火山防災教育

をおこない、その成果を検討する。この検討には NIR 画像及び NIR 3D 画像、火山防災マップ、火山ガス高濃度事象とその発生条件を示すデータを用いる。

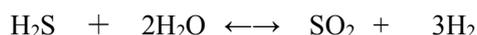
### 1.3. 桜島火山における火山ガスとその防災教育研究史

火山噴火において噴出された火砕物等が運動することによって発生する溶岩流・火砕流等は、その運動が岩石や堆積物等の痕跡として残りやすい。そしてこれを主因とした災害についても自然科学的な痕跡が残る場合が多く、活動した年代によっては写真・日記といった記録として残る場合が多い（例えば、安井ほか，2006）。それゆえ火山災害と被害の概要が後世にさまざまな記録（石碑・口伝・物語・日記等）として伝承されていることもあり、また火山災害に対する慰霊祭が継続している場合もある（例えば、三枝・早川，2001）。桜島火山では2014年1月12日に1914（大正3年）の「大正大噴火」から100年が経過し、多くの機関やメディアがこの噴火による災害を取り上げた。例えば鹿児島県立博物館では2013年6月15日～9月16日まで特別企画展「桜島火山100年の軌跡」を実施し、所蔵している画像等を広く鹿児島県民に紹介した（図1-2）。同様に各機関やメディアは、発生した溶岩流や降灰・火山性地震等の現象とそれよってもたらされた災害に関する記録等も同時に紹介し、再び発生する可能性がある火山災害について啓発したが、その中で火山ガスに関する現象や災害は、画像・映像や記録等がほとんど存在しないこともあって取り上げることはなかった。



図1-2 大正2年9月17日、土中から噴出する火山ガスの測定風景。詳細は不明（画像：鹿児島県立博物館，所蔵）

大気中に放出される火山ガス（H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>等）に関する学術的研究は、火山の活動の程度や火山の性質を示す指標として、また人体に影響を与える有毒成分を含むガスとしてこれまで研究されている。この火山ガスのうち、SO<sub>2</sub>ガスとH<sub>2</sub>Sガスの関係は、生成される際の温度によって次のような化学反応式で表現できる。



地下の高温高压の環境下で存在するH<sub>2</sub>Sガスが地表に向かって上昇する際、比較的高い温度のまま大気中に放出される場合はSO<sub>2</sub>ガスとして、ゆっくりと冷却された後、大気中に放出される場合はH<sub>2</sub>Sガスとなる（木下，2001）。現在のところ高温型火山ガスを大気中に放出している桜島・阿蘇・三宅島雄山等の火山ではSO<sub>2</sub>ガスが、低温型火山ガスを大気中に放出している箱根湯ノ花沢・草津白根山等ではH<sub>2</sub>Sガスが主として発生し、それぞれのガス濃度が高い場合は死亡事故等の災害になるケースがある（平林，2003）。SO<sub>2</sub>ガスは無色で刺激臭のある気体で、その比重は2.26であり、これを吸い込むとSO<sub>2</sub>が呼吸器や眼、喉頭などの粘膜を刺激し、高濃度の状態では呼吸が困難になり、死に至る場合も発生する。またぜん息や心臓病などの疾患を持つ場合、健康な人が認識することができない低濃度でも、発作を誘発したり症状を増悪させることがある（内閣府，2003）。具体的には人体におけるSO<sub>2</sub>ガスの許容濃度は1時間値で5 ppmであり、致死濃度も500～1,000 ppmと極めて毒性が強い気体である（平林，2003）。阿蘇山中岳火口では火口から放出された高濃度のSO<sub>2</sub>ガスが観光客に吹き付け、死に至る火山ガス災害になった例が複数例ある。

H<sub>2</sub>Sガス災害の具体的な例として、2005年12月29日午後、秋田県湯沢市の泥湯温泉奥山旅館近くの雪のくぼ地で、温泉から出たH<sub>2</sub>Sガスによって大学教員とその家族計4人が倒れ、妻、長男、二男が間もなく死亡、大学教員も病院に搬送後、死亡した例が報道された（秋田さきがけ新聞，2005）。このような火山ガスによる痛ましい事件はたびたび報道され、その都度火山ガスに関する国民的な理解と対策の必要性が叫ばれるが、実際に学校教育の中に火山ガスの防災教育が取り入れられることはほとんどない。また一般的に火山ガスが危険であると認識されていても、H<sub>2</sub>SガスとSO<sub>2</sub>ガスの性質や状態・挙動が大きく異なるため（木下，2001；飯野ほか，2002）、これらを一概に「火山ガス」とひとくくりにして、児童・生徒に対して火山防災に関する教育を行うことは危険である。

2000年から5年間にわたって地域住民の全島避難という深刻なSO<sub>2</sub>ガス災害となった三宅島では、長期間の曝露を受けることによって身体に生じる長期的影響（慢性影響）と、瞬時的あるいは短時間に高濃度のSO<sub>2</sub>ガスを吸入することによって身体に現れる短期的影響（急性影響；高感受性者・要援護者・一般人について）の両者について詳しい疫学的調査・研究がおこなわれ（内閣府，2003），ここで行政や研究者等の火山災害の担い手側が火山ガスによってもたらされる災害を考察・評価する際のある一定の基準が作成された。

桜島火山では、鎌田ほか（1985）の研究において、この当時の桜島火山から放出される火山噴煙活動において、日量1,000トンを超えるSO<sub>2</sub>ガスが大気中に放出されていることが明らかにされた。これは桜島火山の火山ガス災害に関する先駆的研究であった。その後火山ガス放出量を測定することが可能なCOSPEC（CORrelation SPECtrometer）やDOAS（Differential Optical Absorption Spectrometer）の進歩に伴って、より詳細に大気中に放出された火山ガスに関する知見を得ることができるようになった（大和田・風早，2005）。しかしこうした精密な観測機器を用いた火山ガス観測は、月間に数度実施という実験頻度でしかおこなわれていない場合が多く、現在のところSO<sub>2</sub>ガスの防災科学研究に活用する継続的な5分間値や1時間値等の細かい観測データを得るまでには至っていない。桜島火山の火口から大気中に放出されるSO<sub>2</sub>ガスの濃度と新生児の突然死には相関があることは、疫学的な研究により確認されており（Shinkura et al., 1999），火山ガスは広範な地域社会に対して深刻な被害をもたらす可能性が十分にあることから（中田ほか，2001；内閣府，2003；坂本・木下，2014），大気中におけるその挙動に関する詳細な研究は今後ますます重要となってくるであろう。

火山ガスを主因とする自然災害が一般に認知されづらいのは、他の地質学的な現象や火山災害と異なり、火口から噴出後周辺に生息する動植物を死滅させる場合を除いてその物的な痕跡を留めることが少ないためと考えられる。また火山ガス自体を可視では認識できない場合も多いために、一般的に地域社会においてこれまで災害として伝承されてこなかった場合も考えられる。これまで主に火山ガスが引き起こす自然災害に関する研究は、火山ガス分子が人体へもたらす疫学的な影響、または特定の地形条件下における局所的な拡散問題に重点が置かれものが多く（小坂ほか，1998；平林，2003），火山ガスが火口から大気中に放出された後、気象条件（風向・風速等）に影響を受けながら移流・拡散する、いわゆる挙動に関する研究は、直江ほか（1993）等の研究はあるが、一般的には言及

されてこなかった。コンピュータを用いた数値シミュレーションによる火山ガス挙動研究は、例えば菱山・政春（1998）をはじめいくつかの研究が散見できる。しかし実際の SO<sub>2</sub> ガスの挙動と数値シミュレーション結果の整合性の検証研究が今後は必要である。

桜島火山の局所における SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象や数十 km～千 km 以上の広域に拡散・移流する火山噴煙・ガスと気象条件に関する研究は、木下紀正教授（当時）の主宰する鹿児島大学教育学部物理学教室を中心とした鹿児島大学噴煙研究グループによって 1990 年代以降から深まりを見せ始めた。また 1992 年からは桜島火山の噴煙の地上観測映像や衛星画像と結びつけた SO<sub>2</sub> ガス地表濃度の研究が開始され、そこで卒論や修士論文としても度々取り組まれた（例えば木下，1992；木下ほか，1994；木下ほか，1998）。これには 1980 年頃から全国的に都市大気汚染監視の機運の高まりも追い風となった。工場排煙による健康被害調査を目的として全国的に SO<sub>2</sub> ガス地表濃度測定局が展開され始め、この機をとらえた鹿児島県・鹿児島市が火山対策基本法による施策の一つとして桜島内外に無人の自動連続測定局を配置し、火口から放出される SO<sub>2</sub> ガスの地表濃度測定を実施し始めた。この桜島・三宅島で展開されているような高水準の SO<sub>2</sub> ガス地表濃度連続測定体制は世界的にほとんど類例がない。ここで得られるデータを活用して、鹿児島大学噴煙研究グループによって局所的な SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象と気象の関連が明らかになり始め、さらに衛星画像・地上観測映像と組み合わせることによって噴煙の挙動の詳細が理解できるようになった。そしてこの研究の結果、強風時に高濃度の SO<sub>2</sub> ガスが火口から山麓に吹き下ろされ、桜島火山山麓における環境基準をはるかに越える高濃度事象の発生メカニズムが新しい知見として得られた。さらにこの研究成果を基礎として鹿児島大学噴煙研究グループは 2000 年噴火以来の三宅島火山ガスに取り組み（例えば、飯野ほか，2003；木下ほか，2006,），2002 年 11 月には鹿児島大学でおこなわれた多島域フォーラムで火山ガス問題の総合的検討をおこなうに至った（木下，2003）。そして現在では桜島火山の火口から大気中に放出される SO<sub>2</sub> ガスの挙動や経年変化研究についても新たな知見が得られている（例えば、坂本・木下，2005；坂本・木下，2014）。しかし長期間にわたる SO<sub>2</sub> ガスの継続研究やその長距離移流、さらに SO<sub>2</sub> ガスと浮遊粒子状物質の相関に関する研究例はまだ少ない状況にある。日本の火山全体を見ても、長期間にわたる火山ガスの変動や黄砂・浮遊粒子状物質（SPM）・微小粒子状物質（PM<sub>2.5</sub>）・降灰量等・黄砂との相関には不明な点が多い。さらに火山ガスや噴煙の大気拡散・長距離移流問題等についても不明な点が多く、これから多方面からさまざまな研究が望まれる。それゆえこうした点について本

研究はアプローチしていく。この火山ガスの大気中での挙動研究は、放射性物質の拡散問題にも応用できる可能性も大いにある（木下・坂本，2008）。

またこうした火山ガスの高濃度事象災害への防災対策をどのように地域住民や児童・生徒に対して理解・普及させていくか、その教育の在り方と利用方法についてこれまで研究された例は少なく、本研究ではこの点についても検討していく。

#### 1.4. 近赤外衛星画像とそれを用いた火山地形教育の研究史

中学校理科教育に関するアンケートの中で、地学分野を教えることが苦手と回答する教師は多い。独立行政法人科学技術振興機構理科教育支援センター・国立教育政策研究所教育課程研究センター（2008）の調査によると、中学校理科教師の44.9%が地学分野を教えることに対して苦手意識を持っていることが判明した。これは理科・地学教育や防災教育にとって大きな問題である。

こうした現状に対して、さまざまな実践的教材開発研究の蓄積がおこなわれている。例えば火山教育分野では、林（2006）によって児童・生徒の身近な食材を活用したキッチン火山学が考案され、ここで火山の成因や活動を児童・生徒にとって身近な教材を用いてわかりやすく体感・理解させる教育実践法を報告している。高柳・早川（2007）も炭酸飲料や食材等を利用し、身近な素材から火山活動を理解させる教材づくりを考案した。また早川・宮永（2008）はデジタル教材を用いた体験学習や野外観察を重視した火山地形学習の方法について考察した。専門的に地学を学んだ経験の少ない初等・中等学校の教師には、このような火山学習方法研究の蓄積があることによって、多様な場面において具体的な学習指導が容易なものとなり、児童・生徒にとっても火山学習が身近で理解しやすいものになる。

現在、火山地形学習に関する教育研究がリモートセンシングや情報工学の進展によって現在の萌芽的なものから大きく発展する可能性が見えてきた（坂本，2007a；坂本，2007b；坂本・木下，2010）。これは、高等学校学習指導要領（文部省，1999）の理科分野においてコンピュータや情報通信ネットワークを活用して情報の収集・検索などを積極的に行うことが強調されはじめたことに端を発し、ここから教室等の学校施設内にインターネット環境が急速に整い始め（越桐，2009），どの教室でも教育内容に関連した情報を入力することができるようになってきたためである。この情報通信技術を活用した教材の開発は、理科教育の多くの分野において、その教育・研究内容を変革させる可能性を有す

る。現在、中学校理科教師が教育に関する研修や教材研究の上でインターネットを活用する割合は 92.0%である（独立行政法人科学技術振興機構理科教育支援センター・国立教育政策研究所教育課程研究センター，2008）。加えて文部科学省（2009）の高校地学基礎・地学の学習指導要領では、野外地形観察を年間指導計画の中で適切な時期に計画しておこなうとなっているが、これに反し、実際の教育現場では野外地形観察の機会が非常に少ないことが指摘されている（宮下，1999；三次，2008）。この野外学習の不足を補完する意味でも、情報工学を活用した教材開発の必要性は大きい。

学習教材として地形図や陰影図，航空写真，数値標高データを基に作成されたカシミール 3D（杉本，2002）や Google Earth (<http://earth.google.co.jp/>) は，画質も良く，用途によっては十分活用できる場合がある。児童・生徒のためのデジタルコンテンツとして 2000 年に公開された鹿児島大学 SiPSE グループが開発した教育用衛星画像表示システム SiPSE（Satellite image Presentation System for Education，以下 SiPSE）（戸越ほか，2000；木下ほか，2005）は，インターネットで簡単な登録をすれば，誰でもパソコン上に SiPSE のフリーソフトをダウンロードすることができる。これを活用すれば，日本のほぼ全域から必要な人工衛星画像を入手することが可能である。さらにこの SiPSE の特長の一つとして，極力地形観察を遮る雲や霧が入っていない衛星画像を使用していることが挙げられ，Google Earth などと比較してノイズの少ない鮮明な画像が得られる。近赤外衛星画像（NIR 画像）の特色としてこれまで次のような教育学的な面からの知見が得られている。(1) 水域と陸域の境界が明確に区分できる。(2) 地形の凹凸が明瞭に分かりやすく，火山地形の特徴をつかみやすい。(3) 植物のない裸地や都市域なども近赤外線反射が少ないために黒く見える。(4) 数値標高データと結合した NIR 画像及び NIR 3D 画像は，火山地形・断層地形・段丘などの識別に活用できる。（Kinoshita et al., 1997；木下ほか，2002；坂本・木下，2006；Sakamoto et al., 2007；Kinoshita and Sakamoto, 2013）。

## 1.5. 本論文の構成

以上の目的を踏まえて，本論文は，本章を含め全6章に構成した。

第2章では、本論文で使用しているデータについてまとめている。桜島火山周辺におけるSO<sub>2</sub> ガス濃度の測定データ、高層気象観測データ、大気環境データ、地上観測映像を示している。

第3章は、桜島火山の火口から大気中に放出されるSO<sub>2</sub> ガス濃度データと気象情報データを用いて高濃度のSO<sub>2</sub> ガスの挙動について考察する。さらに高濃度のSO<sub>2</sub> ガスデータと大気中の浮遊粒子状物質（SPM）や降灰量の相関をピアソンの積率相関係数を用いて明らかにし、今後その活動が活発化することによって発生の可能性がある火山災害について論じる。またこの火山ガスの挙動から火山ガス防災教育の必要性について論じる。

第4章は、人工衛星画像を用いて九州をはじめとするさまざまな火山地形の俯瞰と、その際に用いる近赤外（NIR）衛星画像の有効性について検討する。さらにこの近赤外衛星画像と火山防災マップを用いた地学教育実践をおこない、火山防災に関するスキル向上を目指した教育法について論じる。

第5章は、火山防災に関する学校教育の現状を明らかにし、火山ガス高濃度事象や人工衛星画像、及び火山防災マップを活用した火山防災を活用したつなぎ手としての学校教育の在り方について考察する。

第6章は、結論であり、本論文の総括と火山防災教育研究から見える地域社会の火山防災の在り方について述べる。

## 第2章 使用データ

本章では本研究で用いたデータに関する測定方法やデータの処理方法について述べる。

### 2.1. 火山ガスデータ

鹿児島県および鹿児島市は、大気中に存在するSO<sub>2</sub>ガス濃度およびSPM量を鹿児島県下広域に設置された環境大気測定局において測定している（図2-1）。



図2-1 SO<sub>2</sub>濃度およびSPM測定点の位置. 1.有村局(S) 2.赤水局(W) 3.桜島支局(N) 4.黒神局(E) 5.鹿児島市役所局 6.環境保健センター局 7.鴨池局 8.谷山支局 9.喜入局 10.垂水局 11.鹿屋局 12.東串良局 13.志布志局 14.霧島局 15.郷之原第二公園局 16.羽島局 17.寄田局 18.環境放射線監視センター局 19.薩摩川内局 20.川内保健所局 21.高江局

本研究で使用したSO<sub>2</sub>ガス濃度は、鹿児島県環境林務部環境保全課および鹿児島市環境局環境保全課による環境大気測定局観測点測定データを用いた。SO<sub>2</sub>ガスの濃度測定方法は、溶液導電率法又は紫外線蛍光法を用いて測定されている（鹿児島県，2011）。

環境庁（現環境省）によって定められたSO<sub>2</sub>ガス濃度の環境基準は、短期的評価では

「1時間値の1日平均値が0.04ppm以下であり、かつ、1時間値が0.10ppm以下であること」となっている。長期的評価では「1日平均値の測定値につき、測定値の高いほうから2%の範囲内にあるものを除外した値が0.04ppm以下であり、かつ1日平均値0.04ppmを超える日が2日以上連続しないこと」となっている（環境庁、1973）。データ解析にあたり、本研究では、この環境基準に基づきSO<sub>2</sub>ガス濃度の1時間値濃度が0.10ppm (=100ppb)を超える場合、これを火山ガス高濃度事象とし、その回数を数値化した。

## 2.2. 浮遊粒子状物質データ

鹿児島県および鹿児島市は、大気中に存在する浮遊粒子状物質（SPM）を鹿児島県下広域に設置された環境大気測定局で測定している（図2-1）。本研究で使用したSPM量は、鹿児島県環境林務部環境保全課および鹿児島市環境局環境保全課による環境大気測定局観測点測定データを用いた。SPMは濾過捕集による重量濃度測定方法、またはこの方法によって測定された重量濃度と直線的な関係を有する量が得られる光散乱法、圧電天びん法もしくはベータ線吸収法によって測定されている。これらは環境庁（現環境省）が示した測定基準に準拠しており、全国でも広く用いられている（環境庁、1973）。

環境庁（現環境省）は、浮遊粒子状物質（SPM）に関する環境基準について「大気中に浮遊する粒子状物質であり、その粒径が10 $\mu$ m以下の物質のことを指す」と定義し、これに対する環境基準は、その質量が「1時間値の1日平均値で0.10mg/m<sup>3</sup>以下であり、かつ1時間値が0.20mg/m<sup>3</sup>以下であるもの」と定めた（環境庁、1973）。この環境基準をもとに、先行研究である小山田（2000）および小山田・木下（2000）等のSPM量高濃度事象の定義を参照し、本研究ではそれを「1時間値が100 $\mu$ g/m<sup>3</sup>以上であること」とした。

## 2.3. 降灰量データ

降灰量に関しては、鹿児島県危機管理局危機管理防災課がウェブ上で公開している桜島降灰量観測結果を用いた（鹿児島県危機管理局危機管理防災課、2010；同、2013）。ここでは2010年までは県内59カ所分、それ以降は62カ所における1m<sup>2</sup>あたりの降灰量(g)をPDFデータとしてウェブ上で公開しており、このデータを用いた。

## 2.4. 相関係数について

SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象とSPM量高濃度事象の相関については、測定されたSO<sub>2</sub>ガスの1

日の積算値を X とし、同じく SPM 量の 1 日の積算値を Y とし、X と Y の共分散を X の標準偏差と Y の標準偏差の積で除したピアソンの積率相関係数 r を用いて 1 年ごとの相関係数を算出した。

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

そしてこれにより算出された数値 ( $-1 \leq r \leq 1$ ) によって、SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量の相関の程度を判断した。また各測定局での SPM 量と降灰量の相関係数も SPM 量の一ヶ月間の積算値と降灰量の一ヶ月の間の積算値を用いてピアソンの積率相関係数によって算出した。

## 2.5. 高層気象観測データ

風速・風向のデータは、気象庁が編集し、(財) 気象業務支援センターが発行している「高層気象観測年報」CD-ROM データを使用した。

本研究において、特に断らない限り風向・風速は 925hPa の値である。これらの測定時刻は 9 時、21 時の 2 回である。そして風向 D (°) と、風速 S (m/sec) を用いて解析した。風向 D (°) は北風を 0° とし、時計回りに何度の方角から風が吹いてくるかを表現した。例えば 180° の風は南風、270° の風は西風となる。桜島上空では大きな爆発が発生した場合、噴煙が 3,000~5,000m も上空に上昇する場合は観測されるが、本研究では、先行研究 (木下ほか, 1998) の例にしたがっておおよそ昭和火口の高度に対応する気圧と考えられる 925hPa における風向・風速データを使用した。指定気圧面 925hPa の高度は気象状態によって変化するが、桜島火山の昭和火口の高さにおおよそ同じである海拔約 850m 程度に相当する。

## 2.6. 衛星画像データ

本研究で使用した可視画像・NIR 画像・NIR 3D 画像は、地球観測衛星 Landsat-5 によって撮影された衛星画像を鹿児島大学 SiPSE グループが変換処理し、2000 年に Web

上で一般公開されたデジタルコンテンツである教育用衛星画像表示システム SiPSE (Satellite image Presentation System for Education ; 以下 SiPSE) (戸越ほか, 2000 ; 木下ほか, 2005) を用いて取得した。

LANDSAT-5 の TM センサーは刈り幅 185km で分解能 28.5m, 観測周期は 16 日であり, SiPSE には宇宙開発事業団 NASDA (現宇宙航空研究開発機構 JAXA) が受信した LANDSAT-5 の TM センサーにおける 7つのバンド (表 2-1) のうち, 可視光および近赤外領域の 1~4 のバンドを利用した衛星画像データが準備されている。

表 2-1 LANDSAT-5 の TM センサーの波長域 (μm)

| TM / 波長 | 波長域(μm)       | 領域名   |
|---------|---------------|-------|
| TM-1    | 0.45 - 0.52   | 可視    |
| TM-2    | 0.52 - 0.60   | 可視    |
| TM-3    | 0.63 - 0.69   | 可視    |
| TM-4    | 0.76 - 0.90   | 近赤外   |
| TM-5    | 1.55 - 1.75   | 短波長赤外 |
| TM-6    | 10.40 - 12.50 | 熱赤外   |
| TM-7    | 2.08 - 2.35   | 短波長赤外 |

TM (Thematic Mapper) センサーとは, この衛星に搭載された可視-赤外域での 7つのバンドの検出器のことである。NIR は可視光に近い波長 0.7- 2.5μm の可視光に近い電磁波である。主な用途として光ケーブルでの光通信やテレビのリモコン等のデータ転送用無線通信技術に活用されている。SiPSE データの NIR は LANDSAT-5 の TM バンド 4 の波長 0.76- 0.90μm である。

誰でもインターネットで簡単な登録をすればパソコン上に SiPSE のフリーソフトをダウンロードすることができる。そしてここでは日本のほぼ全域の可視-近赤外域の衛星画像を入手することが可能である。さらに立体視するために用いられる標高データは, 国土地理院発行の数値地図 50m メッシュをもとに, 衛星画像データ (28.5m メッシュ) と組み合わせて画像も作成できる。

画像の標準サイズは, 512 ピクセル (1 辺約 15 km) と 1024 ピクセル (1 辺約 30 km) の画像であり, 用途に応じて使い分けることができる。さらに, 広域を 6 倍までの間引きによって扱うことができる。切り出した SiPSE データは, ホームページからダウンロードできるソフトウェアである SiPSE ビューアによって処理され, 平面画像のままバン

ドの組み合わせを変えることや、書き込みなどの操作が可能である。そして 3D 化して視点の移動や動画としての取り扱いができる。3D 表示では、標高差と水平距離の比率である縦比を 2 倍まで変化させ、高さを強調することもでき、表示倍率の異なる 3D 画像を簡単に作成することができる操作性を有する。SiPSE で作成した画像は Joint Photographic Experts Group (JPEG) 形式であり、さまざまな加工がしやすく、画像上にラインを入れる作業は容易にできる特長を有する。

## 第3章 桜島火山ガスの実態と防災教育の必要性

### 3.1. 2001年-2012年の桜島火山ガス高濃度事象

#### 3.1.1. 各測定局における2001年-2012年のSO<sub>2</sub>およびSPM量高濃度事象

表3-1は、2001年1月1日-2012年12月31日までの4,838日、105,192時間における、各測定局で測定された二酸化硫黄ガス（以下；SO<sub>2</sub>ガス）濃度の1時間値をまとめたものである。ここでは全21測定局での測定期間、測定時数、未測定時数、欠測率、SO<sub>2</sub>ガス濃度最高値(ppb)・SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象発生時数・SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象発生率・SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象発生日数・SO<sub>2</sub>高濃度事象発生日率を示した。1日のうちに1時間でも環境基準を超える高濃度事象が発生した場合、その日をSO<sub>2</sub>ガス高濃度事象発生日として、その日数を合計したものがSO<sub>2</sub>ガス高濃度事象発生日数としている。測定局によって測定時数が異なるのは、測定機器の保守点検・故障等による欠測がある場合と、期間中に測定を中止した測定局が4局、測定を開始した測定局が1局あるためである。

表3-1でわかるように、鹿児島県北西部（串木野・薩摩川内地域）に位置する測定局を除いて、ほとんどの測定局においてSO<sub>2</sub>ガス濃度が環境基準を超える高濃度事象が測定されている。中でも有村局は、1時間値において100ppbを超える高濃度事象時数は4,593時間発生しており、これは有効な測定時数の4.4%を占める。この数値は他の測定局と比較すると突出して高い。また有村局で測定された最も高いSO<sub>2</sub>ガス濃度値は4,530ppbであり、これは環境省の定めた環境基準の45.3倍という値であった。全測定日に対して高濃度事象発生日が占める割合（以下、高濃度事象発生日率）を算出すると、有村局では22.5%となり、これも他の測定局と比較すると突出して高い数値となった。同様に赤水局ではSO<sub>2</sub>ガスの高濃度事象時数が1,934時間測定されており、これから高濃度事象発生時数率が1.9%、高濃度事象発生日率が10.4%となった。次いで黒神局では高濃度事象時数が503時間測定され、高濃度事象発生時数率が0.5%、高濃度事象発生日率が4.2%という結果となった。

表3-2は、2001年1月1日-2012年12月31日までの4,838日、105,192時間（機器調整等による欠測日・時間を含む）における、各測定局のSPM量の1時間値をまとめたものである。表3-1と同様に、全21測定局での測定期間、測定時数、未測定時数、欠測率、SPM量の最高値（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）、SPM量の高濃度事象発生時数・SPM量の高濃度事象発生

表 3-1 各測定局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガスに関するデータ

| 観測局                         | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6        | 7       | 8       | 9       | 10            | 11      | 12      | 13      | 14      | 15            | 16      | 17      | 18          | 19              | 20            | 21            |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------|---------|-------------|-----------------|---------------|---------------|
| 観測局                         | 有村      | 赤水      | 桜島支局    | 黒神      | 鹿児島市役所  | 環境保健センター | 鴨池      | 谷山支局    | 喜入      | 垂水            | 鹿屋      | 東串良     | 志布志     | 霧島      | 郷之原第二公園       | 羽島      | 寄田      | 環境放射線監視センター | 薩摩川内            | 川内保健所         | 高江            |
| 測定期間 (day)                  | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 4,383    | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 1,522         | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 1,525         | 4,383   | 4,383   | 4,383       | 2,832           | 800           | 1,525         |
| 測定時数 (h)                    | 104,150 | 103,664 | 103,846 | 103,582 | 100,691 | 104,352  | 102,988 | 104,012 | 104,218 | 36,105        | 104,244 | 104,194 | 104,348 | 103,824 | 36,251        | 104,421 | 104,344 | 104,441     | 67,525          | 18,857        | 36,201        |
| 未測定時数 (h)                   | 1,042   | 1,528   | 1,346   | 1,610   | 4,501   | 840      | 2,204   | 1,180   | 974     | 423           | 948     | 998     | 844     | 1,368   | 349           | 771     | 848     | 751         | 443             | 343           | 399           |
| 欠測率 (%)                     | 0.99    | 1.45    | 1.28    | 1.53    | 4.28    | 0.80     | 2.10    | 1.12    | 0.93    | 1.16          | 0.90    | 0.95    | 0.80    | 1.30    | 0.95          | 0.73    | 0.81    | 0.71        | 0.65            | 1.79          | 1.09          |
| SO <sub>2</sub> 濃度最高値 (ppb) | 4,530   | 1,590   | 379     | 798     | 361     | 305      | 330     | 198     | 205     | 137           | 268     | 138     | 222     | 172     | 99            | 183     | 80      | 75          | 79              | 40            | 46            |
| 高濃度事象発生時数 (h)               | 4,593   | 1,934   | 148     | 503     | 28      | 37       | 63      | 34      | 4       | 5             | 60      | 3       | 1       | 6       | 0             | 1       | 0       | 0           | 0               | 0             | 0             |
| 高濃度事象発生時数率 (%)              | 4.41    | 1.87    | 0.14    | 0.49    | 0.03    | 0.04     | 0.06    | 0.03    | 0       | 0.01          | 0.06    | 0       | 0       | 0.01    | 0             | 0       | 0       | 0           | 0               | 0             | 0             |
| 高濃度事象発生日数 (day)             | 988     | 456     | 49      | 183     | 18      | 24       | 35      | 20      | 4       | 5             | 35      | 3       | 1       | 6       | 0             | 1       | 0       | 0           | 0               | 0             | 0             |
| 高濃度事象発生日率 (%)               | 22.54   | 10.40   | 1.15    | 4.18    | 0.41    | 0.55     | 0.80    | 0.46    | 0.09    | 0.33          | 0.80    | 0.07    | 0.02    | 0.14    | 0             | 0.02    | 0       | 0           | 0               | 0             | 0             |
| その他                         |         |         |         |         |         |          |         |         |         | 2005年3月<br>廃止 |         |         |         |         | 2005年3月<br>廃止 |         |         |             | 2004年4月<br>から観測 | 2003年3月<br>廃止 | 2005年3月<br>廃止 |

表 3-2 各測定局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された SPM に関するデータ

| 観測局                         | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6        | 7       | 8       | 9       | 10            | 11      | 12      | 13      | 14      | 15            | 16      | 17      | 18          | 19      | 20            | 21            |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------------|---------|---------|-------------|---------|---------------|---------------|
| 観測局                         | 有村      | 赤水      | 桜島支局    | 黒神      | 鹿児島市役所  | 環境保健センター | 鴨池      | 谷山支局    | 喜入      | 垂水            | 鹿屋      | 東串良     | 志布志     | 霧島      | 郷之原第二公園       | 羽島      | 寄田      | 環境放射線監視センター | 薩摩川内    | 川内保健所         | 高江            |
| 測定期間 (day)                  | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 4,383    | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 1,522         | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 4,383   | 1,525         | 4,383   | 4,383   | 4,383       | 4,383   | 800           | 1,525         |
| 測定時数(h)                     | 104,152 | 103,880 | 102,689 | 103,913 | 103,608 | 104,276  | 101,808 | 103,965 | 104,340 | 36,091        | 104,313 | 103,799 | 104,386 | 103,844 | 36,250        | 104,359 | 104,277 | 104,464     | 104,528 | 18,917        | 36,187        |
| 未測定時数 (h)                   | 1,040   | 1,312   | 2,503   | 1,279   | 1,584   | 916      | 3,384   | 1,227   | 852     | 437           | 879     | 1,393   | 806     | 1,348   | 350           | 833     | 915     | 728         | 664     | 283           | 413           |
| 欠測率(%)                      | 0.99    | 1.25    | 2.38    | 1.22    | 1.51    | 0.87     | 3.22    | 1.17    | 0.81    | 1.20          | 0.84    | 1.32    | 0.77    | 1.28    | 0.96          | 0.79    | 0.87    | 0.69        | 0.63    | 1.47          | 1.13          |
| SPM量最高値(μg/m <sup>3</sup> ) | 972     | 1,645   | 513     | 1,965   | 715     | 747      | 1,165   | 557     | 622     | 340           | 841     | 836     | 626     | 684     | 319           | 857     | 727     | 669         | 804     | 345           | 896           |
| 高濃度事象発生時数(h)                | 1,405   | 1,384   | 414     | 568     | 890     | 1,053    | 736     | 503     | 335     | 308           | 549     | 863     | 426     | 454     | 207           | 546     | 626     | 602         | 656     | 194           | 311           |
| 高濃度事象発生時効率 (%)              | 1.35    | 1.33    | 0.40    | 0.55    | 0.86    | 1.01     | 0.72    | 0.48    | 0.32    | 0.85          | 0.53    | 0.83    | 0.41    | 0.44    | 0.57          | 0.52    | 0.60    | 0.58        | 0.63    | 1.03          | 0.86          |
| 高濃度事象発生日数 (day)             | 492     | 452     | 110     | 194     | 373     | 310      | 251     | 165     | 100     | 106           | 195     | 343     | 137     | 140     | 64            | 151     | 213     | 159         | 194     | 47            | 120           |
| 高濃度事象発生日率 (%)               | 11.23   | 10.31   | 2.51    | 4.43    | 8.51    | 7.07     | 5.73    | 3.76    | 2.28    | 2.49          | 4.45    | 7.83    | 3.13    | 3.19    | 1.50          | 3.45    | 4.86    | 3.63        | 4.43    | 1.10          | 2.81          |
| その他                         |         |         |         |         |         |          |         |         |         | 2005年3月<br>廃止 |         |         |         |         | 2005年3月<br>廃止 |         |         |             |         | 2003年3月<br>廃止 | 2005年3月<br>廃止 |

率・SPM量の高濃度事象発生日数・SPM量の高濃度事象発生日率を示した。この場合も、1日のうちに1回でも1時間値が $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える事象が発生した時、その日をSPM量高濃度事象発生日とし、その日数を合計したものがSPM量の高濃度事象発生日数としてここで数字で表した。測定時数が異なるのは、これも測定機器の保守点検・故障等による欠測がある場合と、期間中に測定を中止した測定局が4局あるためである。

すべての局において1時間値が $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えるSPM量の高濃度事象が発生した。有村局は $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える高濃度事象時数が1,405時間であり、これは有効な測定時数の1.4%を占める結果となった。また桜島西部にある赤水局も $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える高濃度事象が1,384時間測定された。SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象では見られなかった現象として、鴨池局で測定されたSPM量の最高値が $1,165\mu\text{g}/\text{m}^3$ と高い値を示し、また $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える高濃度事象の時数が736時間(0.7%)と、SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象と比較すると極端に高い割合になる。これは小山田(2002)でも示唆されているが、黄砂や自動車等の排煙の影響である可能性も高い。同様に環境保健センターも高い数値を示しており、これも鴨池局と同じ可能性が考えられる。

### 3.1.2. 桜島火山SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象の特徴

各測定局において2001年-2012年にかけて測定された桜島SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象は、総計すると7,415回であった(全16局の合計;期間中測定を廃止した局および途中から測定を開始した局のデータは除く)。これを年別・月別に区分したグラフを図3-1に示す。2005年における桜島火山の爆発的噴火回数は12回と比較的少なく、また2006年は爆発的噴火回数が15回とこれも少ないものであった(鹿児島地方気象台,2013a)。これらの年は桜島SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象も他年と比較して少なく、300回前後であった。しかし爆発的噴火回数が996回であった2011年の桜島SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象は1094回、爆発的噴火回数が885回であった2012年の桜島SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象は1257回と急増した(図3-1-A)。またこれらを月別に区分すると(図3-1-B)、桜島火山のSO<sub>2</sub>ガス高濃度事象は冬期を中心に多く測定され、夏期に少ない傾向が読み取れる。この原因については後述する。

次に有村局、赤水局、黒神局、そして桜島支局の島内4局を例にして、それぞれのSO<sub>2</sub>ガスの高濃度事象について検討し、その結果とSPMの測定量と降灰量との相関に

ついて述べる。

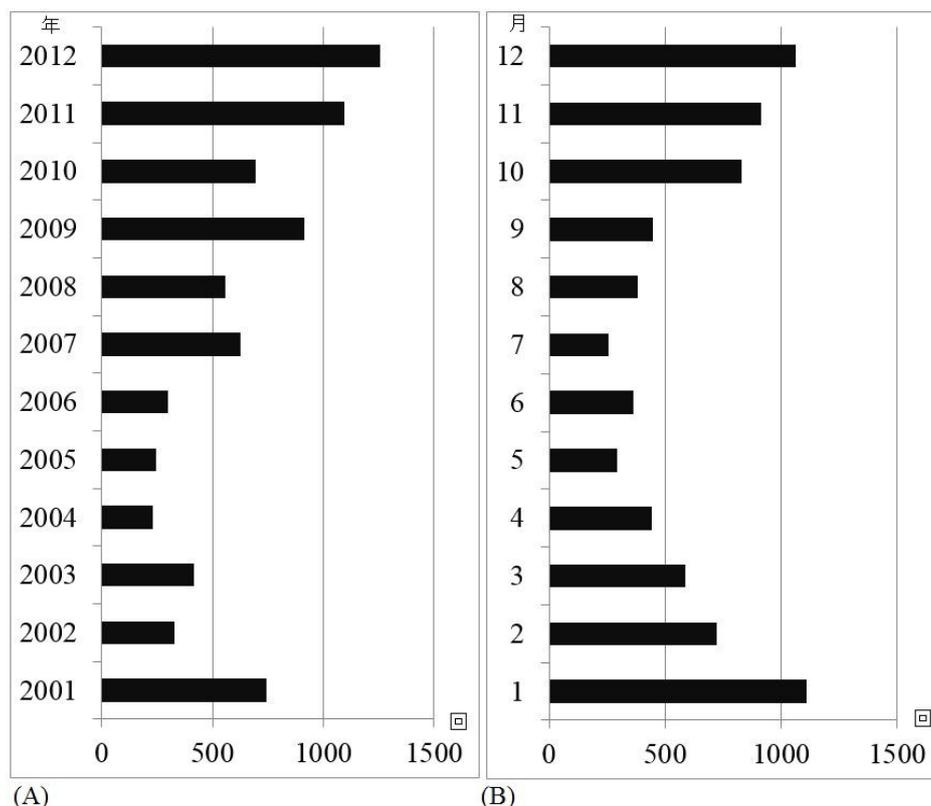


図 3-1 各測定局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された桜島火山 SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の年別変化の合計(A)と、月別変化の合計(B)

(全 16 局の合計；期間中観測を廃止した局および途中から観測を開始した局のデータは除く)

### 3.1.3. 有村局における SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量の高濃度事象

桜島南側に位置する有村局（図 2-1）において 2001 年- 2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、総計で 4,593 回であった。その年別・月別合計グラフを図 3-2 に示す。有村局における 2009 年での SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は 657 回、2011 年に 658 回となり、2002 年-2006 年と比較すると 3~4 倍程度多く測定された（図 3-2-A）。これらを月別に区分すると、1 月に 1,028 回、12 月に 936 回測定されており、有村局では冬期を中心として SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が頻発し、夏期に少ないことがわかる（図 3-2-B）。これは気圧配置がいわゆる西高東低の冬型になり、強風の北風が卓越する場合に火口の南に位置する有村局に SO<sub>2</sub> ガスが吹き付けるため高濃度事象が発生する。こうした高濃度事象の発生メカニズムは、例えば坂本・木下（2005）によって詳しく論述され

ている。そして桜島火山の周囲に設置されている全測定局における SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象に対して有村局の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が占める割合は 61.9%と大きい。そのため全体の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の特徴に、図 3-2-(B)に示した有村局の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の特徴が反映することになる。

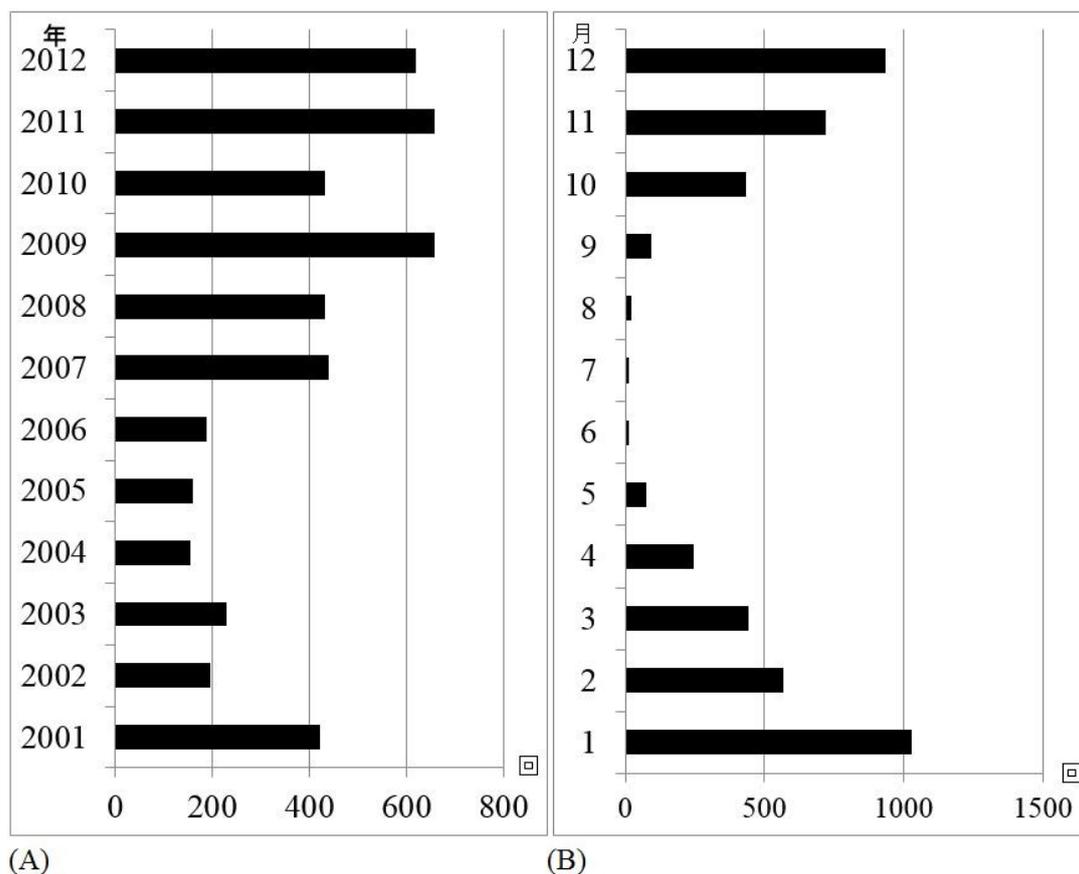


図 3-2 有村局で 2001 年-2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の年別変化(A)と、月別変化(B)

表 3-3 は有村局で 9 時・21 時に測定された SO<sub>2</sub> ガスの高濃度事象の特徴を示したものである。ここで 9 時・21 時の高濃度事象に限定して議論するのは、鹿児島地方気象台がこの時刻のみ高層の風向・風速を測定しているためである。有村局において 2001 年-2012 年にかけて測定されたこの 9 時・21 時に限定した SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、合計で 504 回であり、このうち風速が 8 m/sec 以上である割合は 77.4%であった。またその風向が 310°以上 30°以下である割合が 88.3%であった。そしてこの二つの条件を満たす SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の発生割合は 74.4%であった。

表 3-3 有村局の 2001 年-2012 年にかけて測定された 9 時・21 時での SO<sub>2</sub> ガス濃度高濃度事象の特徴

|     |                                   |       |
|-----|-----------------------------------|-------|
|     | 9時と21時の測定時数                       | 8724  |
|     | 9時と21時における高濃度事象時数                 | 504   |
|     | 全体に対する割合(%)                       | 5.8%  |
|     | 高濃度事象のうち風速 8 m/sec 以上の時数          | 390   |
| 有村局 | 高濃度事象504時間に対する全体に対する割合(%)         | 77.4% |
|     | 風向が310°以上30°以下の高濃度事象時数(80°以内)     | 445   |
|     | 高濃度事象504時間に対する全体に対する割合(%)         | 88.3% |
|     | 風向が300°以上30°以下で 8 m/sec以上の高濃度事象時数 | 375   |
|     | 高濃度事象504時間に対する全体に対する割合(%)         | 74.4% |

次に有村局において 2001 年-2012 年にかけて測定された 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える SPM 量高濃度事象の年別・月別データを表 3-4 に示す。この表からわかるように、桜島火山の活動が盛んになってきた 2009 年以降、SPM 量高濃度事象も増加していることがわかる。また SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象同様、冬期を中心に SPM 量高濃度事象が測定されており、夏期が少ないことがわかる。

有村局において 2001 年-2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量の 1 時間値の日毎積算量の相関について、ピアソンの積率相関係数を用いて求めたものが図 3-3 である。この 1 時間値の日毎積算量における SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量の間には、2009 年から正の相関が認められるようになり、特に 2012 年には 0.72 と高い正の相関が認められた。また同様に有村局における SPM 量 1 時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値の相関係数を求めると、これも同様に 2009 年から正の相関が出はじめ、2012 年では相関係数が 0.86 と非常に高い正の相関が認められた。SPM の発生源は、工場等の産業活動によるものだけでなく、ディーゼルエンジン等を搭載している自動車の走行による排気ガス (DEP:ディーゼル排出微粒子) やタイヤの巻き上げによるもの、稲わら焼却の煙、黄砂や大陸からの大気汚染物質の移流によるものも含まれると考えられていた (小山田・木下, 2000 ; 山崎, 2004) が、本論文により火山の噴煙活動が多くなることによっても大気中の SPM 量が増加することが明らかになった。

表 3-4 有村局で 2001 年-2012 年にかけて測定された SPM 量高濃度事象（100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上）の年別・月別時間数。行が月，列が年

|      | 1   | 2   | 3   | 4  | 5   | 6  | 7  | 8   | 9  | 10  | 11 | 12  |      |
|------|-----|-----|-----|----|-----|----|----|-----|----|-----|----|-----|------|
| 2012 | 58  | 34  | 26  | 2  | 11  | 2  | 0  | 7   | 11 | 36  | 22 | 22  | 231  |
| 2011 | 18  | 17  | 29  | 6  | 68  | 0  | 1  | 0   | 20 | 24  | 16 | 78  | 277  |
| 2010 | 19  | 50  | 29  | 14 | 6   | 4  | 4  | 13  | 2  | 16  | 14 | 3   | 174  |
| 2009 | 15  | 4   | 10  | 14 | 0   | 0  | 9  | 3   | 6  | 17  | 19 | 44  | 141  |
| 2008 | 0   | 1   | 4   | 0  | 1   | 0  | 0  | 30  | 1  | 0   | 2  | 15  | 54   |
| 2007 | 1   | 0   | 0   | 14 | 26  | 2  | 41 | 4   | 3  | 0   | 0  | 1   | 92   |
| 2006 | 0   | 0   | 3   | 7  | 2   | 0  | 2  | 1   | 1  | 3   | 0  | 0   | 19   |
| 2005 | 0   | 0   | 0   | 3  | 2   | 1  | 13 | 2   | 0  | 0   | 5  | 2   | 28   |
| 2004 | 1   | 3   | 0   | 0  | 2   | 2  | 10 | 5   | 6  | 6   | 3  | 0   | 38   |
| 2003 | 1   | 2   | 2   | 2  | 1   | 1  | 3  | 5   | 11 | 8   | 0  | 0   | 36   |
| 2002 | 7   | 4   | 22  | 20 | 0   | 4  | 1  | 2   | 2  | 9   | 15 | 3   | 89   |
| 2001 | 63  | 16  | 67  | 13 | 6   | 0  | 10 | 39  | 7  | 3   | 2  | 0   | 226  |
| 計    | 183 | 131 | 192 | 95 | 125 | 16 | 94 | 111 | 70 | 122 | 98 | 168 | 1405 |

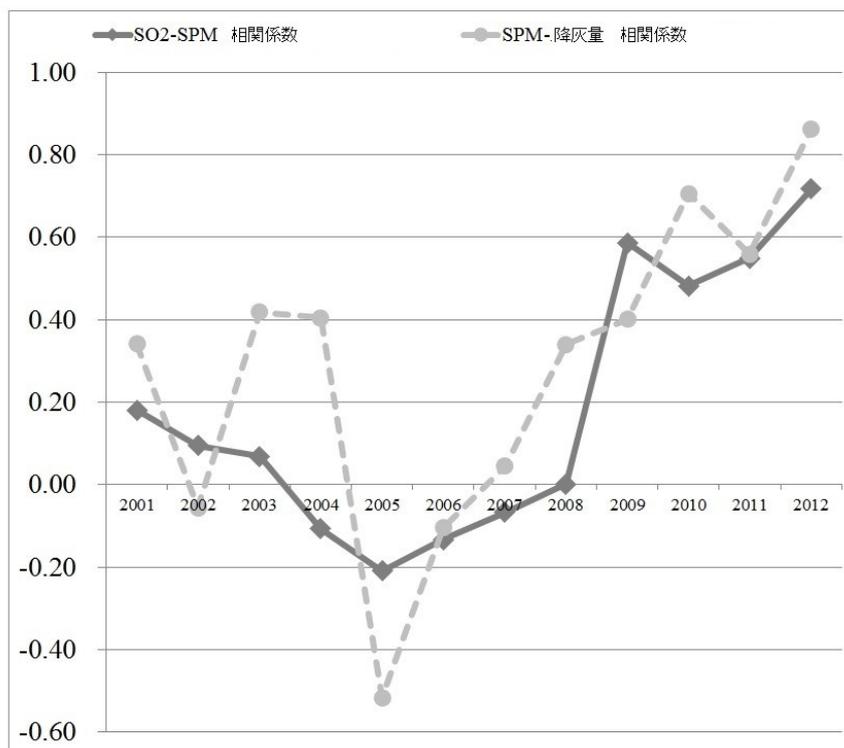


図 3-3 有村局で 2001 年-2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガス 1 時間値の日毎積算値と SPM 量 1 時間値の日毎積算値の年別相関係数グラフ及び SPM 量 1 時間値の月別積算値と有村局降灰量月別積算値の相関係数グラフ。縦軸は相関係数，横軸は年

表 3-5 有村局の 2001 年-2012 年における年別・月別降灰量を示した表。行が月，列が年。降灰量の単位は g/m<sup>2</sup>

|      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6     | 7     | 8     | 9     | 10     | 11     | 12     | 計       |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
| 2001 | 1,251  | 736    | 307    | 258    | 986    | 212   | 307   | 189   | 109   | 133    | 56     | 18     | 4,562   |
| 2002 | 57     | 24     | 134    | 128    | 41     | 11    | 28    | 56    | 101   | 288    | 1,314  | 22     | 2,204   |
| 2003 | 84     | 189    | 31     | 17     | 9      | 9     | 6     | 4     | 204   | 89     | 21     | 33     | 696     |
| 2004 | 24     | 69     | 22     | 18     | 90     | 28    | 38    | 68    | 16    | 34     | 7      | 13     | 427     |
| 2005 | 36     | 9      | 9      | 8      | 5      | 8     | 4     | 3     | 5     | 10     | 13     | 52     | 162     |
| 2006 | 5      | 9      | 21     | 22     | 3      | 71    | 3     | 25    | 4     | 9      | 22     | 23     | 217     |
| 2007 | 343    | 11     | 81     | 35     | 59     | 17    | 3     | 5     | 2     | 2      | 1      | 11     | 570     |
| 2008 | 7      | 593    | 9      | 393    | 3,185  | 143   | 8     | 11    | 5     | 18     | 102    | 44     | 4,518   |
| 2009 | 170    | 276    | 2,220  | 569    | 83     | 383   | 142   | 264   | 1,072 | 717    | 2,014  | 6,145  | 14,055  |
| 2010 | 10,997 | 7,975  | 2,834  | 4,566  | 3,092  | 253   | 622   | 279   | 147   | 591    | 1,681  | 4,220  | 37,257  |
| 2011 | 8,456  | 4,839  | 2,257  | 979    | 743    | 418   | 447   | 1,092 | 2,760 | 4,574  | 1,920  | 9,269  | 37,754  |
| 2012 | 9,109  | 5,348  | 5,582  | 3,659  | 4,086  | 1,038 | 1,122 | 863   | 955   | 3,823  | 4,150  | 4,889  | 44,624  |
| 計    | 30,539 | 20,078 | 13,507 | 10,652 | 12,382 | 2,591 | 2,730 | 2,859 | 5,380 | 10,288 | 11,301 | 24,739 | 147,046 |

この有村局において 2001 年-2012 年にかけて測定された 1m<sup>2</sup>あたりの降灰量(g)を月別に積算したものを表 3-5 に示す。有村局では、2001 年-2012 年にかけて総計 147,046 g/m<sup>3</sup> の降灰量が測定されており、その量は桜島火山の活動が盛んになると急激に増加する傾向にある。

### 3.1.4. 赤水局とその周辺における SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量の高濃度事象

桜島西側に位置する赤水局（図 2-1）において 2001 年-2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、総計で 1,934 回であった。年別に区分してみると（図 3-4-A）、2011 年に 346 回、2012 年に 431 回と、近年急激にそれが増加してきたことがわかる。この SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象を月別に区分すると(図 3-4-B)、9 月が 324 回、10 月が 354 回測定されており、9 月・10 月に高濃度事象が発生しやすいことがわかる。

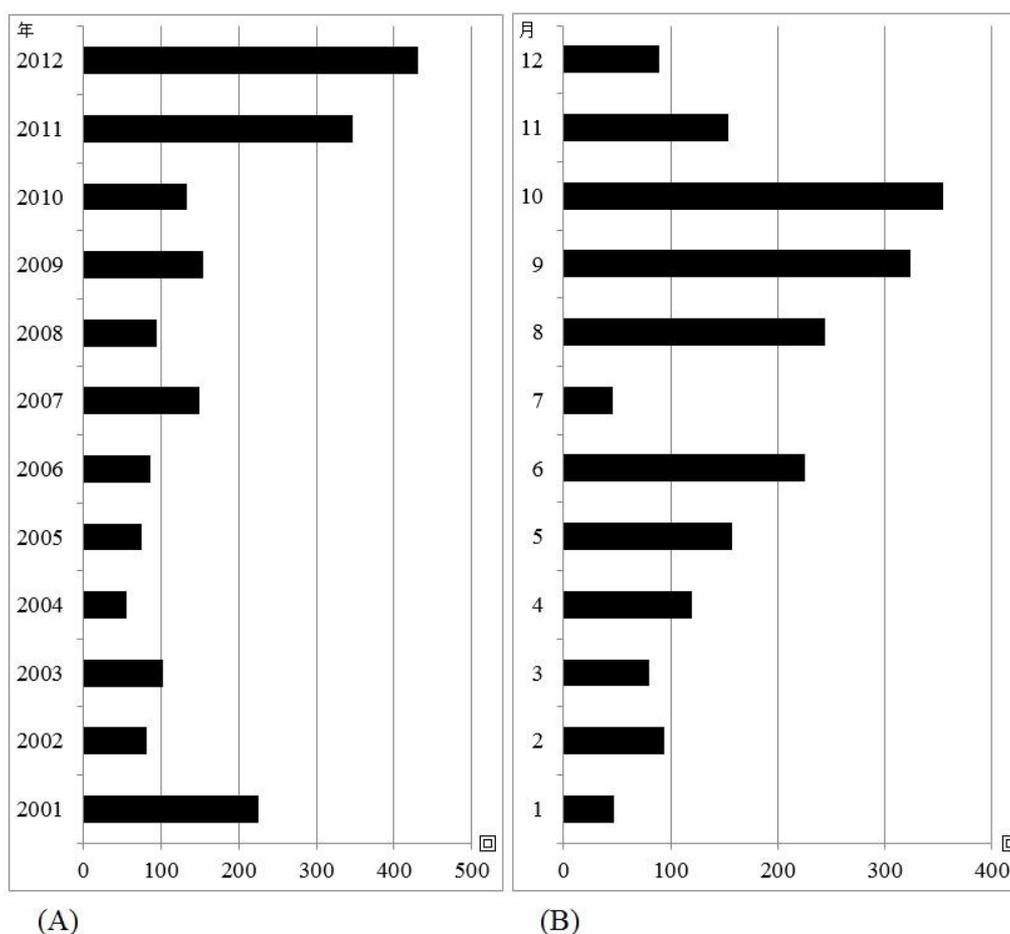


図 3-4 赤水局で 2001 年-2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の年別変化(A)と月別変化(B)

赤水局で特徴的に見られる SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、2011 年 11 月 2 日 8 時に測定した環境基準の 15.9 倍にあたる 1,590 ppb であった。このときの SO<sub>2</sub> ガス濃度 1 時間値の推移を図 3-5 に示す。

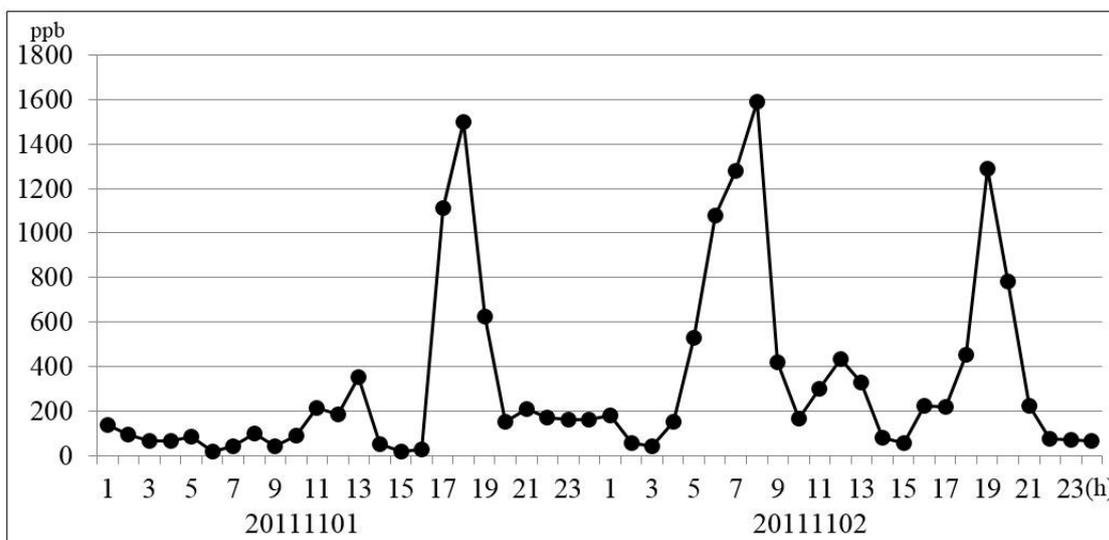


図 3-5 赤水局で 2011 年 11 月 1 日-2 日にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガス濃度変化

赤水局で測定される SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の特徴は、SO<sub>2</sub> ガスの高濃度が突発的に測定されることが挙げられる。これは坂本・木下（2009）でも論じられたとおり、低気圧が鹿児島島の南の海上を西から東に移動する際に発生する、南低北高の気圧配置時（気象庁、2013a）に生じる強風下での東風に起因する。2011 年 11 月 1 日 9 時の風速は 6 m/sec、風向は 102°、21 時の風速は 8 m/sec、同年 11 月 2 日 9 時の風速は 11 m/sec、風向は 116°、21 時の風速は 9 m/sec、風向は 118°であった。東からの強風によって風下の赤水局に SO<sub>2</sub> ガスが吹き降ろされ、図 3-5 のような SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が測定された。

表 3-6 赤水局で 2001 年-2012 年にかけて測定された 9 時・21 時での SO<sub>2</sub> ガス濃度高濃度事象の特徴

|     |  |       |
|-----|--|-------|
| 赤水局 | 9時と21時の測定時数                            | 8687  |
|     | 9時と21時における高濃度事象時数                      | 170   |
|     | 全体に対する割合(%)                            | 2.0%  |
|     | 高濃度事象のうち風速 8 m/sec 以上の時数               | 79    |
|     | 高濃度事象170時間に対する全体に対する割合(%)              | 46.5% |
|     | 風向が50°以上125°以下の高濃度事象時数(75°以内)          | 142   |
|     | 高濃度事象170時間に対する全体に対する割合(%)              | 83.5% |
|     | 風向が 50° 以上 125° 以下で 8 m/sec 以上の高濃度事象時数 | 73    |
|     | 高濃度事象79時間に対する全体に対する割合(%)               | 42.9% |

表 3-6 は、赤水局で 9 時・21 時に観測された SO<sub>2</sub> ガスの高濃度事象の特徴を示したものである。赤水局で 2001 年-2012 年にかけて測定されたこの 9 時・21 時の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象回数は、総計で 170 回あり、このうち風速が 8 m/sec 以上だった割合は 46.5% であった。またその風向が 50°以上 125°以下である割合は 83.5% であった。風速が 8 m/sec 以上であり、風向が 50°以上 125°以下という二つの条件を満たす SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の観測結果は全体の 42.9% であった。

特に注目される事象として、弱風下において赤水局を中心として広範囲に SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が測定されたケースを報告する。

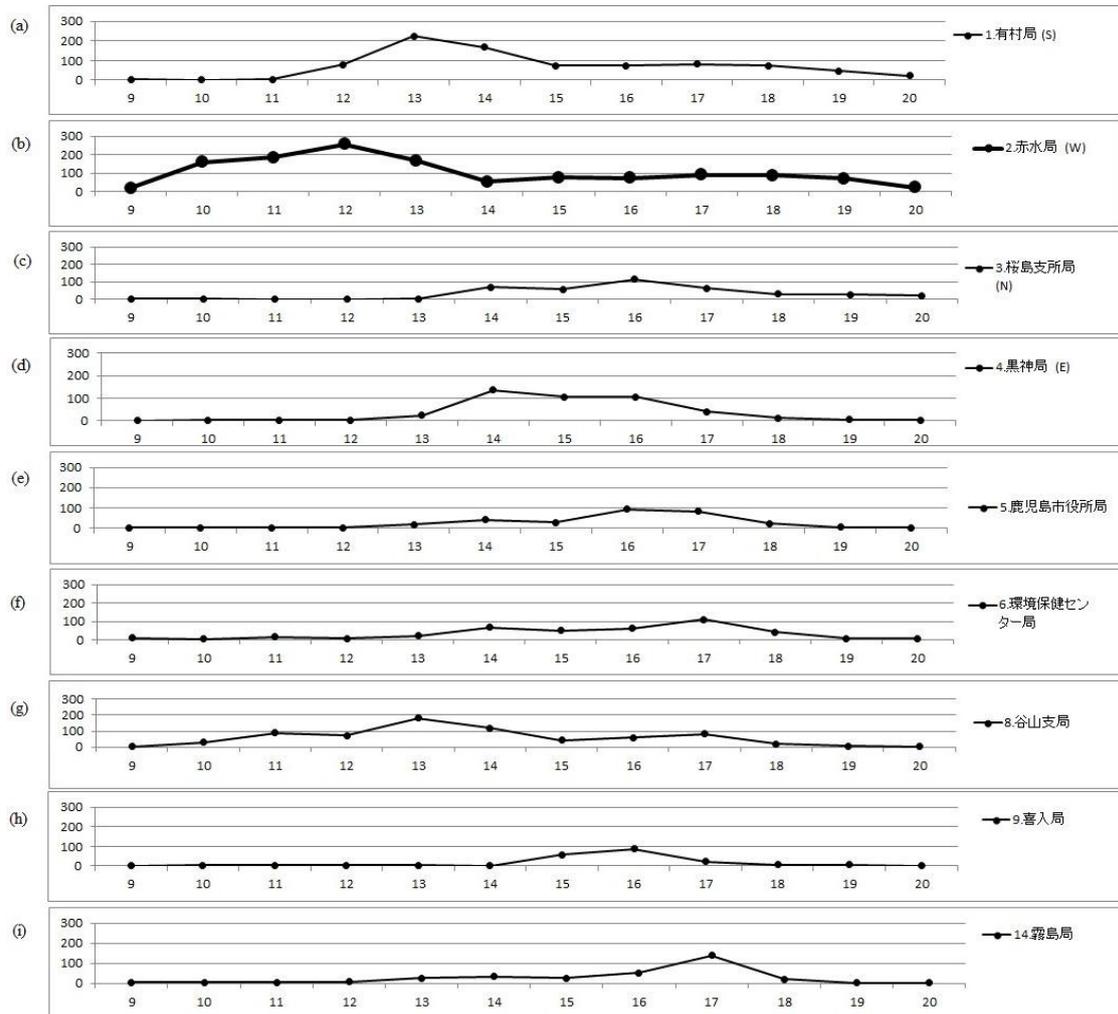


図 3-6 赤水局と桜島火山周辺に設置されている測定局で 2012 年 10 月 12 日にみられた弱風下での SO<sub>2</sub> ガスの濃度変化。縦軸は濃度(ppb)、横軸は時刻  
 (a) 1.有村局, (b) 2.赤水局, (c) 3.桜島支局, (d) 4.黒神局, (e) 5.鹿児島市役所局, (f) 6.環境保健センター局, (g) 8.谷山支局, (h) 9.喜入局, (i) 14.霧島局

図 3-6 に示すように、2012 年 10 月 12 日赤水局では、10 時に SO<sub>2</sub> ガス濃度が 160ppb、12 時に 257ppb 測定された。この高濃度事象と前後して、桜島火山周辺の他の測定局でも SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が測定された。

表 3-7 鹿児島市における 2012 年 10 月 12 日 8 時-21 時の地上風の方位と風速 (気象庁,2013b)

| 時間        | 8時 | 9時  | 10時 | 11時 | 12時 | 13時 | 14時 | 15時 | 16時 | 17時 | 18時 | 19時 | 20時 | 21時 |
|-----------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 16方位      | 北  | 北北東 | 北   | 南南東 | 北北東 | 東   | 東北東 | 南南東 | 南南東 | 南   | 西北西 | 北西  | 北西  | 北東  |
| 風速(m/sec) | 4  | 4   | 1   | 2   | 1   | 3   | 4   | 3   | 3   | 2   | 3   | 2   | 2   | 5   |

925hPa の高度における 9 時の風速は 2 m/sec, 風向は 38°, 21 時の風速は 1 m/sec, 風向は 237°であった。当日 9 時の天気図（気象庁, 2013a）や表 7 で示す地上付近における気象条件（気象庁, 2013b）を用いてこの事象を考察すると, この時, 赤水局では鹿児島島の北方を西から東に移動する高気圧の勢力下であり, 好天であった。山頂付近や噴煙が流れる高度の風速は弱く, SO<sub>2</sub>ガスは桜島火山上空にゆっくりと広く拡散し, 地上付近の大気と入れかわったり混合する現象である対流混合が発生した（木下, 1996 ; 木下ほか, 1998）。それゆえ地上付近に高濃度の SO<sub>2</sub>ガスをもたらすことになるこの大気は, 地形や摩擦によって変化しやすい地上風の風向に支配され, 桜島火山周辺全域において SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象を発生させたと考えられる。

次に赤水局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された 100µg/m<sup>3</sup>を超える SPM 量高濃度事象の年別・月別データを表 3-8 に示す。赤水局の場合, 有村局とは異なり, 桜島火山の活動が盛んになってきた 2009 年以降においても SPM 量高濃度事象に急増傾向はみられない。また赤水局における SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象と異なり, 季節別の発生頻度も明瞭な差はないと思われる。

赤水局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub>ガス 1 時間値の日毎積算値と SPM 量 1 時間値の日毎積算値の年別相関, および SPM 量 1 時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値の相関について, ピアソンの積率相関係数を用いて求めたものが図 3-8 である。この SO<sub>2</sub>ガスと SPM 量の 1 時間値の日毎積算量の相関は, 赤水局においてはどの年も高いものではないが, 2011 年および 2012 年には正の相関がみられる。また赤水局における SPM 量 1 時間値の月毎積算値と降灰量の月毎積算値の相関では, 2009 年および 2010 年, 2011 年には正の相関がみられるが, 他の年は低い相関がみられるか, あるいはまったく相関はない。つまり赤水局では 2001 年を除いて, 桜島火山の噴火による降灰量が増加しても地上付近の大気中に存在する SPM 量がそれに比例して増加するわけではないことがわかった。

表 3-8 赤水局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された SPM 量高濃度事象（100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上）の年別・月別時間数。行が月，列が年

|      | 1  | 2  | 3   | 4   | 5   | 6  | 7   | 8   | 9   | 10  | 11 | 12 |      |
|------|----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|
| 2012 | 2  | 11 | 2   | 12  | 4   | 34 | 2   | 36  | 12  | 35  | 11 | 2  | 163  |
| 2011 | 0  | 13 | 0   | 10  | 88  | 0  | 1   | 11  | 41  | 24  | 22 | 2  | 212  |
| 2010 | 2  | 2  | 13  | 4   | 3   | 10 | 3   | 40  | 2   | 11  | 15 | 3  | 108  |
| 2009 | 11 | 12 | 8   | 7   | 2   | 9  | 0   | 11  | 15  | 8   | 2  | 2  | 87   |
| 2008 | 15 | 3  | 5   | 0   | 2   | 0  | 1   | 29  | 70  | 0   | 5  | 12 | 142  |
| 2007 | 1  | 1  | 0   | 18  | 1   | 11 | 60  | 15  | 0   | 1   | 1  | 3  | 112  |
| 2006 | 0  | 1  | 12  | 17  | 3   | 1  | 2   | 3   | 0   | 9   | 0  | 0  | 48   |
| 2005 | 0  | 1  | 5   | 4   | 1   | 6  | 28  | 12  | 3   | 5   | 6  | 0  | 71   |
| 2004 | 2  | 7  | 1   | 1   | 0   | 5  | 20  | 7   | 6   | 5   | 0  | 3  | 57   |
| 2003 | 1  | 8  | 6   | 0   | 0   | 1  | 6   | 1   | 5   | 2   | 3  | 5  | 38   |
| 2002 | 8  | 1  | 33  | 43  | 0   | 5  | 5   | 0   | 3   | 6   | 13 | 3  | 120  |
| 2001 | 15 | 8  | 61  | 13  | 7   | 0  | 4   | 56  | 19  | 43  | 0  | 0  | 226  |
| 計    | 57 | 68 | 146 | 129 | 111 | 82 | 132 | 221 | 176 | 149 | 78 | 35 | 1384 |

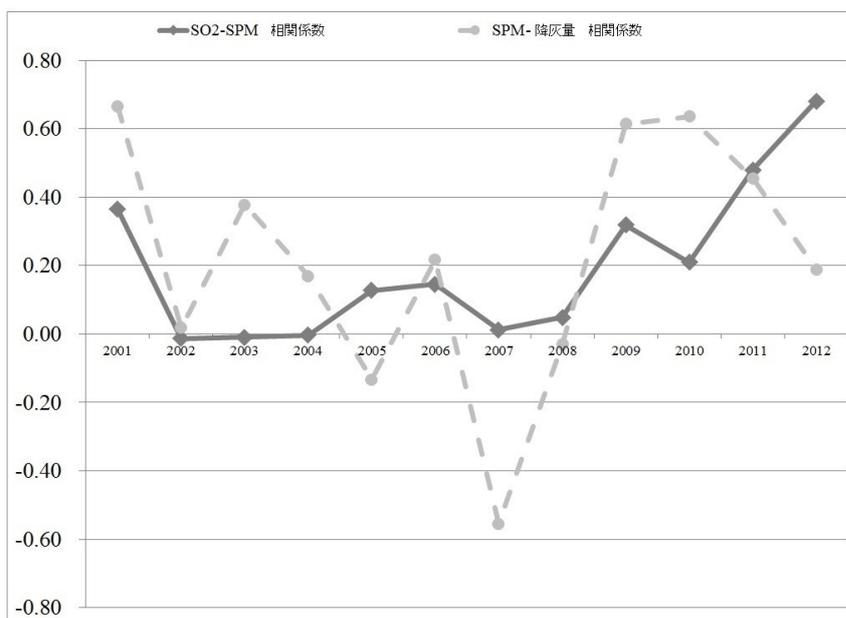


図 3-7 赤水局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガス 1 時間値の日毎積算値と SPM 量 1 時間値の日毎積算値の年別相関係数グラフおよび SPM 量 1 時間値の月毎積算値と赤水局降灰量月毎積算値の相関係数グラフ。縦軸は相関係数，横軸は年

### 3.1.5. 黒神局における SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量の高濃度事象

桜島東側に位置する黒神局（図 2-1）で 2001 年- 2012 年に測定された SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の年別グラフをみると（図 3-8-A），2001 年に 78 回，2003 年 70 回，2010 年に 75 回，またその月別グラフ（図 3-8-B）をみると，6 月に 85 回，7 月に 162 回と夏期を中心に測定されたことがわかる。

表 3-9 は，黒神局で 9 時・21 時に観測された SO<sub>2</sub> ガスの高濃度事象の特徴を示したものである。黒神局で 2001 年- 2012 年にかけて測定されたこの 9 時・21 時の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象回数は総計 34 回であり，このすべての風速が 8m/sec 以上で測定されている。またその風向が 250°以上 280°以下という非常に狭い角度内で測定された割合は 97.1%であった。風速が 8m/sec 以上であり，風向が 250°以上 280°以下という二つの条件を満たす SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の測定結果も全体の 97.1%であった。木下ほか(1994)は，黒神局で高濃度事象が発生するときは，南高北低の気圧配置であり，九州北部や日本海側を低気圧の通過する際に測定されるため，有村局のように高濃度事象が長時間続くことは少ないが，山頂からの吹き降ろしにより短時間に非常に大きな数値を示す可能性がある」と述べている。

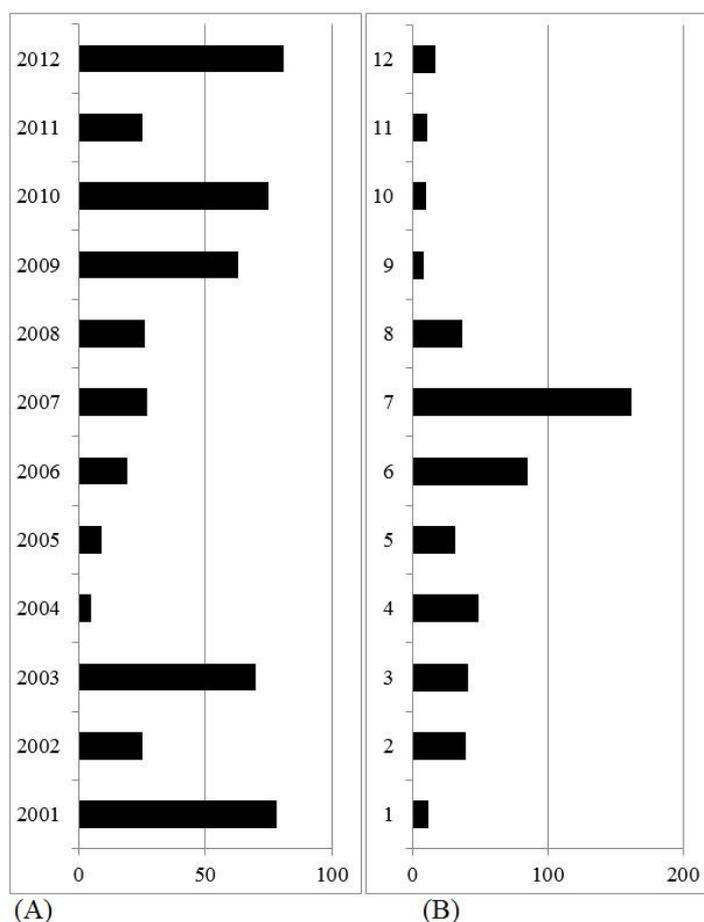


図 3-8 黒神局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の年別変化(A)と月別変化(B)

表 3-9 黒神局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された 9 時・21 時での SO<sub>2</sub> ガス濃度高濃度事象の特徴

|     |   |       |
|-----|---|-------|
| 黒神局 | 9時と21時の測定時数                             | 8663  |
|     | 9時と21時における高濃度事象時数                       | 34    |
|     | 全体に対する割合(%)                             | 0.4%  |
|     | 高濃度事象のうち風速 8 m/sec 以上の時数                | 34    |
|     | 高濃度事象34時間に対する全体に対する割合(%)                | 100%  |
|     | 風向が 250° 以上 280° 以下の高濃度事象時数(30°以内)      | 33    |
|     | 高濃度事象34時間に対する全体に対する割合(%)                | 97.1% |
|     | 風向が 250° 以上 280° 以下で 8 m/sec 以上の高濃度事象時数 | 33    |
|     | 高濃度事象34時間に対する全体に対する割合(%)                | 97.1% |

表 3-10 黒神局で 2001 年-2012 年にかけて測定された SPM 量高濃度事象（100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上）の年別・月別時間数。行が月，列が年

|      | 1  | 2  | 3   | 4  | 5  | 6  | 7   | 8   | 9  | 10 | 11 | 12 |     |
|------|----|----|-----|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|-----|
| 2012 | 0  | 1  | 3   | 10 | 5  | 7  | 21  | 3   | 1  | 0  | 1  | 0  | 52  |
| 2011 | 0  | 17 | 4   | 6  | 49 | 1  | 5   | 0   | 0  | 0  | 2  | 1  | 85  |
| 2010 | 17 | 5  | 18  | 2  | 7  | 0  | 6   | 5   | 0  | 0  | 2  | 4  | 66  |
| 2009 | 1  | 14 | 1   | 1  | 0  | 0  | 8   | 7   | 7  | 1  | 2  | 7  | 49  |
| 2008 | 18 | 2  | 10  | 1  | 1  | 1  | 0   | 12  | 0  | 0  | 1  | 9  | 55  |
| 2007 | 1  | 6  | 0   | 14 | 26 | 3  | 31  | 1   | 0  | 0  | 2  | 1  | 85  |
| 2006 | 5  | 0  | 3   | 6  | 0  | 0  | 0   | 0   | 1  | 0  | 0  | 2  | 17  |
| 2005 | 0  | 0  | 0   | 1  | 0  | 0  | 13  | 0   | 0  | 0  | 1  | 0  | 15  |
| 2004 | 19 | 22 | 0   | 0  | 0  | 1  | 1   | 0   | 3  | 0  | 0  | 3  | 49  |
| 2003 | 11 | 11 | 7   | 2  | 0  | 3  | 14  | 31  | 8  | 2  | 3  | 16 | 108 |
| 2002 | 12 | 10 | 24  | 28 | 0  | 0  | 1   | 8   | 0  | 14 | 18 | 3  | 118 |
| 2001 | 10 | 10 | 55  | 17 | 3  | 8  | 16  | 61  | 6  | 0  | 4  | 1  | 191 |
| 計    | 94 | 98 | 125 | 88 | 91 | 24 | 116 | 128 | 26 | 17 | 36 | 47 | 890 |

次に黒神局で 2001 年- 2012 年にかけて測定された  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$  を超える SPM 量高濃度事象の年別・月別データを表 3-10 に示す。SPM 量高濃度事象 ( $100\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上) は期間中 890 回測定されており、2001 年を除いて大きな変化は見受けられない。有村局でみられた 2009 年以降の急増傾向も、黒神局ではみられない。また夏期を中心に測定される黒神局の  $\text{SO}_2$  ガス高濃度事象と異なり、SPM 量高濃度事象は季節別に明瞭な差はないと思われる。

黒神局で 2001 年-2012 年にかけて測定された  $\text{SO}_2$  ガス 1 時間値の日毎積算値と SPM 量 1 時間値の日毎積算値の年別相関、および SPM 量 1 時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値の相関について、ピアソンの積率相関係数を用いて求めたものが図 3-9 である。

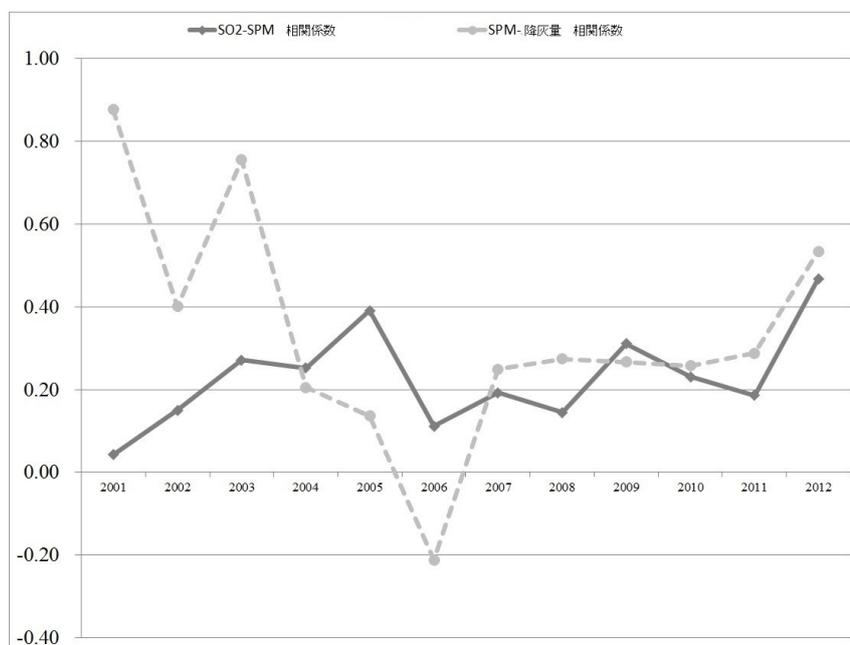


図 3-9 黒神局で 2001 年-2012 年にかけて測定された  $\text{SO}_2$  ガス 1 時間値の日毎積算値と SPM 量 1 時間値の日毎積算値の年別相関係数グラフおよび SPM 量 1 時間値の月毎積算値と黒神局降灰量月別積算値の相関係数グラフ。縦軸は相関係数、横軸は年

この  $\text{SO}_2$  ガスと SPM 量の 1 時間値の日毎積算量の相関は、黒神局においては 2012 年に正の相関がみられる。また黒神局における SPM 量 1 時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値の相関を求めると、2007 年から低い正の相関が見られるようになり、2012 年には正の相関がみられるようになった。

### 3.1.6. 桜島支局における SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量の高濃度事象

桜島北側に位置する桜島支局（図 2-1）で 2001 年-2012 年に測定された SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の年別グラフをみると（図 3-10-A）， 2002 年に 26 回，2010 年に 20 回，2011 年に 24 回，2012 年に 36 回測定されている。また月別グラフ（図 3-10-B）をみると，7 月に 28 回，8 月に 37 回，9 月に 19 回と夏期を中心に測定されたことがわかる。つまり桜島支局で発生した 148 回の高濃度事象のうち，7 月が 18.9%，8 月が 25.0%，9 月が 12.8%と，この 3 ヶ月間で全体の 56.7%を占めることになる。10 月・11 月・12 月・1 月・2 月・3 月の 6 ヶ月間が占める割合は 14.2%である。

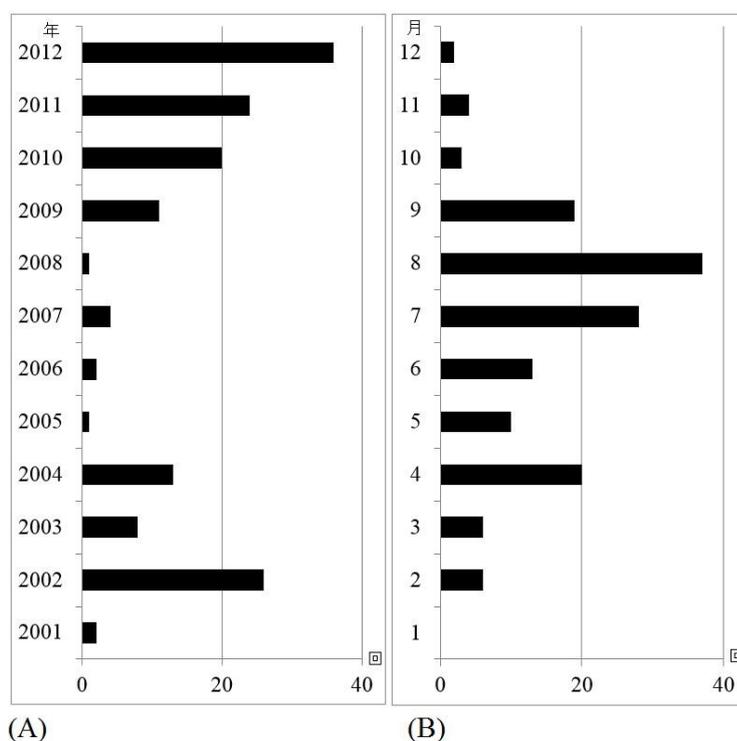


図 3-10 桜島支局で 2001 年-2012 年にかけて測定された SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の年別変化(A)と月別変化(B)

表 3-11 は，桜島支局で 9 時・21 時に観測された SO<sub>2</sub> ガスの高濃度事象の特徴を示したものである。桜島支局で 2001 年-2012 年にかけて測定されたこの 9 時・21 時の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は，総計で 10 回あり，このうち風速が 8 m/sec 以上であった割合は 90%であった。またその風向が 150°以上 190°以下という 40°という非常に狭い角度の中で測定されている割合は 90%であった。風速が 8 m/sec 以上であり，風向が 150°以上 190°以下という二つの条件を満たす SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の観測結果は，全体の 80%であった。

表 3-11 桜島支局で 2001 年-2012 年にかけて測定された 9 時・21 時での SO<sub>2</sub> ガス濃度高濃度事象の特徴

|      |   |      |
|------|---|------|
| 桜島支局 | 9時と21時の測定時数                             | 8698 |
|      | 9時と21時における高濃度事象時数                       | 10   |
|      | 全体に対する割合(%)                             | 0.1% |
|      | 高濃度事象のうち風速8m/sec以上の時数                   | 9    |
|      | 高濃度事象10時間に対する全体に対する割合(%)                | 90%  |
|      | 風向が150°以上190°以下の高濃度事象時数(40°以内)          | 9    |
|      | 高濃度事象10時間に対する全体に対する割合(%)                | 90%  |
|      | 風向が 150° 以上 190° 以下で 8 m/sec 以上の高濃度事象時数 | 8    |
|      | 高濃度事象10時間に対する全体に対する割合(%)                | 80%  |

### 3.1.7. 桜島火山の SO<sub>2</sub> ガスの島外移流

これまで述べたように、桜島島内の各測定局で測定されたSO<sub>2</sub>ガス濃度と風向・風速には明確な関連がある。しかし桜島火山SO<sub>2</sub>ガスの長距離移流と島外の地表濃度の関係についてはこれまで多くの議論はなされてこなかった。ただし視覚的に認識しやすい火山灰などについては、衛星画像の解析から下流に向かって長距離移流するいくつかのパターンが明らかにされている（飯野・木下，1996）。

2009年12月18日-19日にかけて、有村局、鹿屋局、東串良局においてSO<sub>2</sub>ガスの移流現象が測定された。この時、風速は18日9時で15m/sec、風向は322°であった。各測定局の位置を図3-11に示す。またこの3測定局のSO<sub>2</sub>ガス濃度変化グラフを図3-12に示す。

18日20時前後からこの3測定局のSO<sub>2</sub>ガス濃度が高くなり始めた。同日21時の風速は18m/secという強風であり、風向は304°と桜島昭和火口から鹿屋・東串良方面へ向いていた。翌19日3時までこの事象は続き、同日9時の風速は17m/sec、風向は326°と変化し、これにより鹿屋局への移流は続くが東串良局への移流はなくなった。

木下ほか(2001)は2000年8月に関東地方で異臭騒ぎが起こった問題を発端として高濃度のSO<sub>2</sub>ガスによる三宅島雄山火山活動を論じている。今回、強風下の桜島火山において大気中に放出されたSO<sub>2</sub>ガスは、大気中に拡散せず、下流の平地に高濃度のまま吹き付けた。この現象を例として昭和火口から測定局までの距離が大きくなることに対して、単純に大気中のSO<sub>2</sub>ガス濃度が低下するわけではなく、SO<sub>2</sub>ガスの濃度が高いまま維持される場合があることが明らかになった。

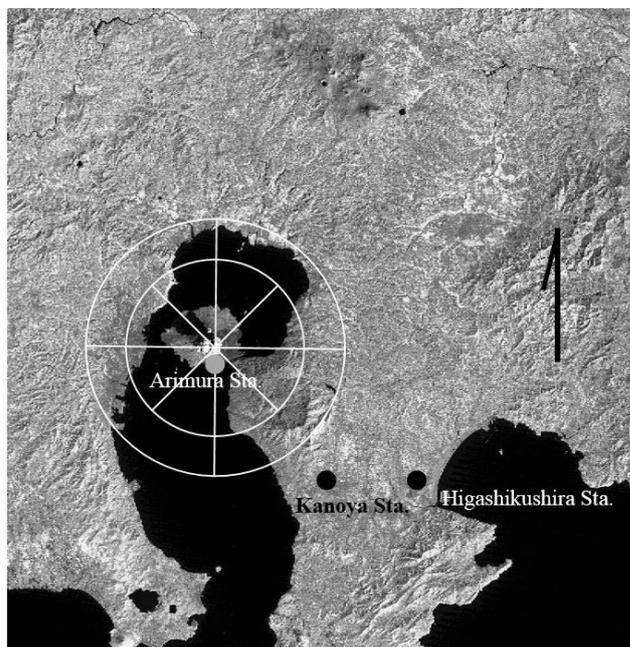


図 3-11 桜島昭和火口から南東の方向に設置されている有村局，鹿屋局，東串良局

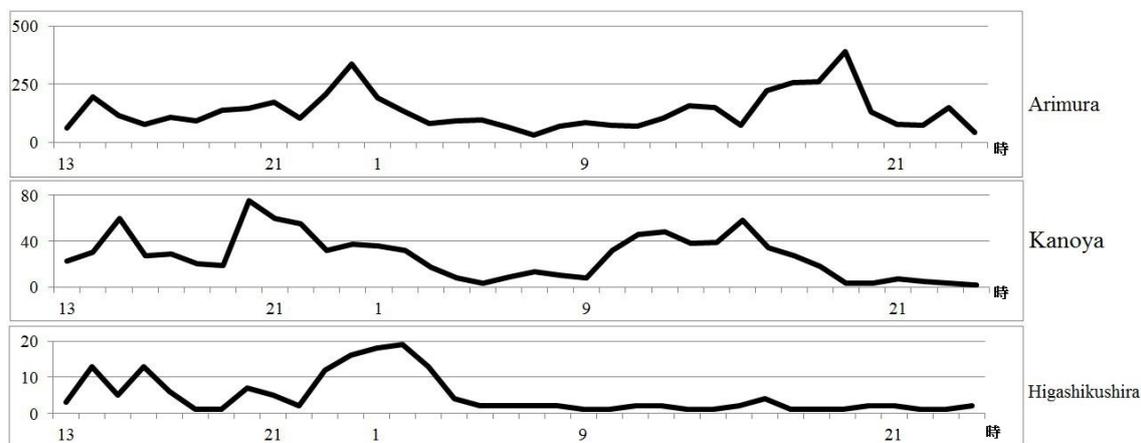


図 3-12 桜島火山南東方向の3測定局（有村局・鹿屋局・東串良局）において2009年12月18日13時-19日にかけて測定されたSO<sub>2</sub>ガスの濃度変化。縦軸の単位はppb

### 3.2. 本章の考察とまとめ

桜島火山防災は、鹿児島湾周辺の地域住民が早急に取り組むべき課題となっている。その中でも災害の痕跡が残りにくい火山ガス災害にどう対応するかは大きな課題である。三宅島雄山の火山ガス災害の例から考えてみても、多くの地域住民の避難を伴う可能性が出てくる複合的な災害であるだけに、早急に対策を講ずる必要性がある。

有村局について検討すると、SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象時数（4,593 時間）は、今回測定された全 SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の 61.9%占める。またこの SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象のみならず、SPM 量高濃度事象時数（1,405 時間）や大量の降灰も高い相関を持つだけに対策を講じなければならない。本章において SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象と SPM 量高濃度事象、そして SPM 量高濃度事象と降灰量の相関を論じたが、これにより有村局では桜島の火山活動が盛んになり、大量の SO<sub>2</sub> ガスを大気中に放出するようになると、同時に大気中には大量の SPM が存在するようになり、また降灰も激しくなる可能性があることを示した。それゆえ火山災害対策は個別の災害素因に対してそれぞれ対策を講ずるだけでなく、複合的な災害になることを予想し、それぞれの災害素因を組み合わせた場合も想定していく必要がある。

島内 4 測定局で測定される SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、気圧配置と密接な関係があり、火口や噴煙の流れる高度での風速が 8m/sec 以上である場合が多い。またこの強風下において風向を知ることで SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の発生予測も可能となる。特に黒神局では風向が 250°以上 280°以下という 30° 以内の角度で SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が発生することから、発生予測情報を自動化することも可能となるかもしれない。さらに強風下では SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は遠く離れた下流域でも起こる場合もあるため、島内だけでなく、広く南九州全域で警戒が必要であろう。弱風下で桜島火山が活発に活動する際、上空の大気中に放出された SO<sub>2</sub> ガスは、地上の空気と対流混合を起こし、SO<sub>2</sub> ガスが地上付近にゆっくりと降りてくる。この SO<sub>2</sub> ガスは地上風の影響を受けやすいため、あらゆる方向で高濃度事象が発生させる場合があることも本研究で明らかになった。以上のような火山ガスの挙動は風向・風速と強い関連性があるため、火山防災教育・火山ガス防災教育の教材として活用しやすい。

気象条件に左右されやすい SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、特に発生頻度の高い桜島島内ではその対策は早急に必要であり、さらに桜島島外に対しても火山の活動状況と気象に注意を払い、的確に地域住民に火山ガス情報を提供していく防災システムの構築が必要である。

以下、次の(1)～(15)を本章のまとめとする。

- (1) 環境基準を超える桜島火山 SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、平穏期であった 2008 年までの 300 回～600 回前後であったが、2009 年以降急増し始め、2011 年は 1094 回、2012 年は 1257 回測定された。
- (2) 桜島火山の周囲に設置されている全測定局が測定した SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象に対する有村局の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が占める割合は 61.9%である。そのため全体の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の特徴に、有村局の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の特徴が反映する。

- (3) 有村局で SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が発生する場合は、以下の①～③に当てはまる傾向が強い。①西高東低の冬型の気圧配置であること、②風速が 8m/sec 以上の強風下であること、③風向が 310°以上 30°以下であること。
- (4) 有村局では、桜島火山の爆発・噴煙活動が少なかった 2001 年-2008 年は、SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量、そして降灰量はほとんど相関がないが、2009 年以降は互いに高い正の相関が認められるようになった。
- (5) 有村局では火山の噴煙活動が多くなることによって SPM 量が増加する。
- (6) 赤水局の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、総計で 1,934 回であり、年別に区分してみると 2011 年に 346 回、2012 年に 431 回と、年々増加傾向にある。
- (7) 弱風下における桜島火山周辺において、SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が明らかになった。弱風下ではゆっくりと桜島火山上空に拡散した SO<sub>2</sub> ガスが、対流混合によって地上の大気と混合し、変化しやすい地上風の風向に支配され、桜島火山周辺全域の観測局で高濃度事象が見られた。
- (8) 赤水局において、2011 年および 2012 年において SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量の 1 時間値の日毎積算量に正の相関がみられた。
- (9) 黒神局で SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が測定できる場合は、以下の①～③に当てはまる傾向が強い。①南高北低の気圧配置であること、②風速が 8m/sec 以上の強風下であること、③風向が 250°以上 280°以下であること。
- (10) 黒神局において、2012 年の SO<sub>2</sub> ガスと SPM 量の 1 時間値の日毎積算量には正の相関がみられる。また SPM 量 1 時間値の月毎積算値と降灰量月毎積算値には、2007 年から低い正の相関が見られるようになり、2012 年には正の相関がみられるようになった。
- (11) 桜島支局における 2001 年-2012 年における SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は夏期に集中する。
- (12) 桜島支局で SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が測定できる場合は、以下の①～③に当てはまる傾向が強い。①風速が 8m/sec 以上であること。②風向が 150°以上 190°以下であること。
- (13) 島外の観測局での SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、火口から遠距離であっても強風であれば下流地域で発生する可能性がある。また、好天時には火口から放出された SO<sub>2</sub> ガスがある一定の高度を維持しながら移流する際、対流混合によって地上付近で高濃度事象を発生させる可能性がある。
- (14) 火山活動が盛んになると SO<sub>2</sub> ガス濃度高濃度事象・SPM 量高濃度事象・降灰量は同時に増加し始め、複合的な災害になる可能性が高い。それゆえ桜島火山の周囲では火山噴

出物に対してそれぞれ個別の対策だけではなく，総合的な防災対策を採るべきである。

- (15) 桜島火山の活動状況と気象に注意を払い，的確に地域住民に情報を提供していく防災システムの構築が必要である。

## 第 4 章 人工衛星画像を用いた火山地形判読と教育利用

### 4.1. 火山地形学習教材に用いる衛星画像

#### 4.1.1. 学習教材としての地形表示画像

これまで航空写真や衛星画像を用いて火山やその地形に関する学習をおこなう場合は、多額の画像取得経費や情報機器等に関する専門的な知識・技能が必要であった。しかし近年では、高画質の人工衛星画像を得ることができるサイトが一般のユーザー向けに無料もしくは安価で公開されている。例えば、学習教材として地形図や陰影図、航空写真、数値標高データを基に作成されたカシミール 3D (杉本, 2002) や、2004 年に始まり 2006 年に日本語版が公開された Google Earth (<http://earth.google.co.jp/>) は、画質も良く、用途によっては十分に教育用として用いることができる水準にある。それゆえ火山学や火山地形学習、地質学や地理学の分野で多様に用いられている。

しかし航空写真や Google Earth は、画像中に雲や霧が映り地形が不鮮明である場合があり、適切な画像が入手しづらく、局所的な地形の観察が多い火山地形学習の教材としては十分ではない場合がある。また撮影した年や季節、時刻によっては植生の影響や陰影が色濃く残るため、地形の経年変化に関する学習等を妨げる場合がある。さらにこれらは可視光のみによる画像である場合がほとんどである。加えて航空写真は学習者が見たい角度・スケールで対象を俯瞰することができないため、探求型の学習には適さない場合もある。カシミール 3D は、DEM (Digital Elevation Model) の数値標高データによる画像であるため、さまざまなデジタル地図・衛星画像や GPS などの情報機器と組み合わせた操作が可能になる反面、こうした加工技能を持たない教師や児童・生徒は、現実感のある画像が得られない場合がある。地形図も同様であり、等高線が描く曲線によって地形が持っている特徴を捉えやすいが、児童・生徒は実像でないために現実感のあるものとして識別できないことが考えられる (坂本, 2007b ; 坂本, 2013)。

#### 4.1.2. 教育用衛星画像表示システム SiPSE と近赤外衛星画像

2000 年に公開された鹿児島大学 SiPSE グループが開発したデジタルコンテンツである教育用衛星画像表示システム SiPSE (Satellite image Presentation System for Education ; 以下 SiPSE) (戸越ほか, 2000 ; 木下ほか, 2005) は、インターネットで簡単な登録をすれば、誰でもパソコン上に SiPSE のフリーソフトをダウンロードすることができる。これを活用

すれば、日本のほぼ全域から必要な人工衛星画像を入手することが可能である。さらにこの SiPSE の特長の一つとして、極力地形観察を遮る雲や霧が入っていない衛星画像を使用していることが挙げられ、これを利用すれば Google Earth 等と比較して、ノイズの少ない鮮明な画像が得られる。SiPSE では、画面上においてマウスで始点と終点を指定すると、始点と終点のデータから割り出した実際の距離を計算し表示する機能が付されており、さらにマウスで表示されている画像上の調べたい範囲を囲んでダブルクリックすると、データから割り出したその範囲の実際の面積と、範囲の縦横の距離を計算し表示する機能もある。こうした機能は、SiPSE を使用する生徒・児童が簡単に自宅から学習対象物までの距離や、防災教育に用いる際には、被害が想定される範囲の面積等を測定することができる。

SiPSE データの NIR は LANDSAT-5 の TM バンド 4 の波長 0.76~0.90 $\mu\text{m}$  である。教育的に活用する NIR 画像には次の(1)~(4)の特長・特色がある。

- (1) NIR は、水に吸収される性質があるため、NIR 画像では水域と陸域の境界を明確に見分けることができる。NIR 画像を用いると学習者が陸域内で河川や湖沼、火口湖などの地形の要素を短い時間で識別しやすいという点は、可視画像や地形図より優れている。
- (2) NIR は、可視光に比べ大気による散乱が少ないため、その画像は太陽直射の陰影によって地形の凹凸が分かりやすく、火山地形の特徴をつかみやすい。
- (3) 植物のない裸地や都市域なども近赤外線反射が少ないために黒く見え、その性質から植生の状態や土地の利用度なども理解することができる (Kinoshita et al., 1997)。
- (4) 数値標高データと結合した可視立体視画像および近赤外立体視画像 (以下 NIR 3D 画像) は、火山・断層地形、段丘などの識別に活用できる (木下ほか, 2002 ; 坂本・木下, 2006 ; Sakamoto et al., 2007 ; Kinoshita et al., 2013)。

本章では、火山地形を概観する際に NIR 画像・NIR3D 画像が有効であることについて論じる。また衛星画像を火山教育教材として活用する際に、学習者が火山地形の特徴を認識し、主体的に火山地形に関する学習をおこなう際の教材に NIR 画像・NIR 3D 画像が適していることを論じる。具体的には、図 4-1 の①~⑧の地域の火山地形、および諏訪之瀬島火山、箱根火山、伊豆大島、図 4-2 の南西諸島の特徴を可視画像、NIR 画像、NIR 3D 画像を用いて認識し、火山地形・防災学習の教材化を図ると共に、火山防災教育における活用法について検討する。

## 4.2. 衛星画像およびその立体表示による火山地形の検討

### 4.2.1. 九州の地形と火山分布の概観

九州地方の地形を大局的に見るため、Landsat-5 観測による軌道と観測日の異なる雲のない NIR 画像をマージして図 4-1 に示す。日本時間で午前 10 時頃の南東方向からの日射の陰影により、山地と平野部などの分布の様相が分かりやすい。特に、九州中南部に位置する九州山地の大きな広がりを見れば、その険しさを示す陰影を鮮明に認識できる。その北縁は九州を横断する中央構造線の一部をなす臼杵-八代構造線（矢部，1926）で区切られ、阿蘇火山の火砕流堆積物で埋められた地形に接している（小野，1984）。その地形は凹凸のある九州山地と対照的に陰影の少ない滑らかな地形であることがわかる。図 4-1 中には平野部を流れる大きな河川の流路が認められるが、さらに分解能を上げれば多くの河川の詳細も見ることができる。このように NIR 画像を用いて九州の地形を概観すると、その地形の特徴が陰影や地質構造によって理解できる場合があり、これは地形学習用教材として有効である。

図 4-1 では、顕著な火山地形として、九州の北東部に① 国東半島の両子山火山、② 由布岳・鶴見岳・九重火山、③ 阿蘇カルデラと阿蘇火山群、北西部に④ 多良岳火山、⑤ 雲仙火山、南部に⑥ 加久藤・小林カルデラ、⑦ 始良カルデラ、⑧ 阿多カルデラが概観できる。このうち①と④は最近 1 万年の活動を条件とする活火山ではないが、第四紀火山の大規模な地形である。九州の北部から中部にかけて、北東-南西に延伸する別府-島原地溝（松本，1979）に沿って②・③・⑤が存在し、九州の南部では鹿児島地溝（露木，1969）に沿って北北東-南南西に⑥・⑦・⑧が存在する。本小節では、まずこの①～⑧について衛星画像を用いて概観する。次に日本列島の地形学・地質学的特徴の一つに島弧が挙げられる。日本列島付近におけるこの島弧は、千島弧・東北日本弧・伊豆小笠原弧・西南日本弧・琉球弧の 5 つに分けることができ（酒井，2003）、それぞれに特徴的な島弧-海溝系の地形・地質をみる事ができる。この島弧のひとつである琉球弧は、その上に存在する多くの島嶼が九州から台湾にかけて東北-南西方向に連なり、この島嶼の特徴的な連なりは、南東側に少しふくらんだ弧状をしている（図 4-2）。そして総距離は 1,300 km にもなり、東側の琉球海溝と西側の沖縄トラフの間において、火山フロントを境に非火山性の特徴を持つ琉球外弧と火山性のそれを持つ琉球内弧を形成している。この琉球弧に関する研究は、その黎明期の研究である小藤（1897）の南西諸島の地形学・地質学的視点からみた研究から、現在では地球物理学や生物分類学等の研究分野も取り込み、そのテクトニクスが総合的に解明されつつある。

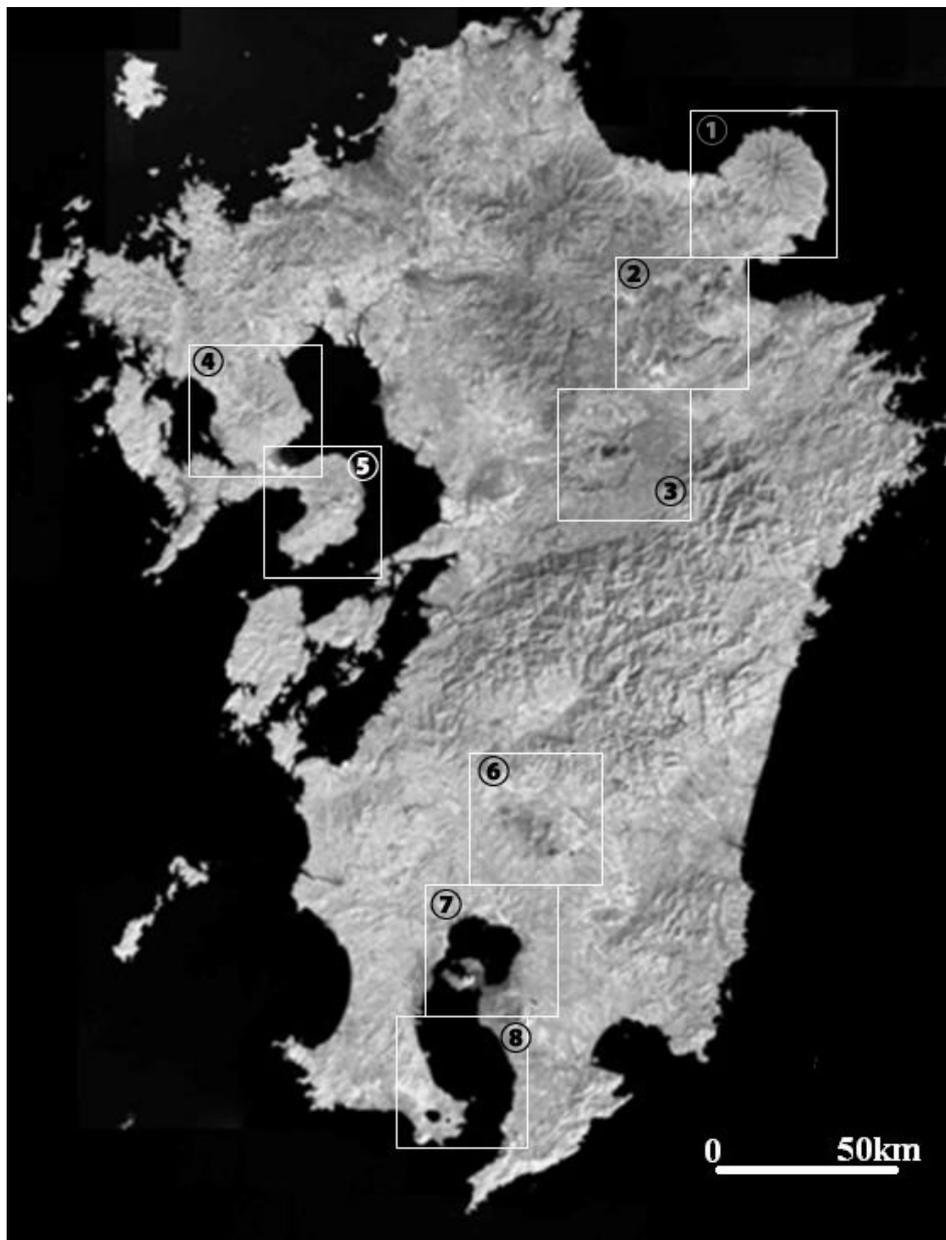


図 4-1 九州本土における第四紀火山およびカルデラの位置。ランドサット 5 号による NIR 画像 ① 国東半島および両子山, ② 由布・鶴見岳・九重火山, ③阿蘇カルデラおよび阿蘇火山群, ④ 多良岳火山, ⑤ 雲仙火山, ⑥ 加久藤・小林カルデラおよび霧島火山群, ⑦始良カルデラおよび桜島火山, ⑧阿多カルデラおよび開聞岳

さらに図 4-2 によって詳しくこの南西諸島の地質学的特徴を太平洋側から東シナ海側へたどっていくと、琉球海溝の西側に琉球外弧にあたる非火山性で比較的大きな面積を有す

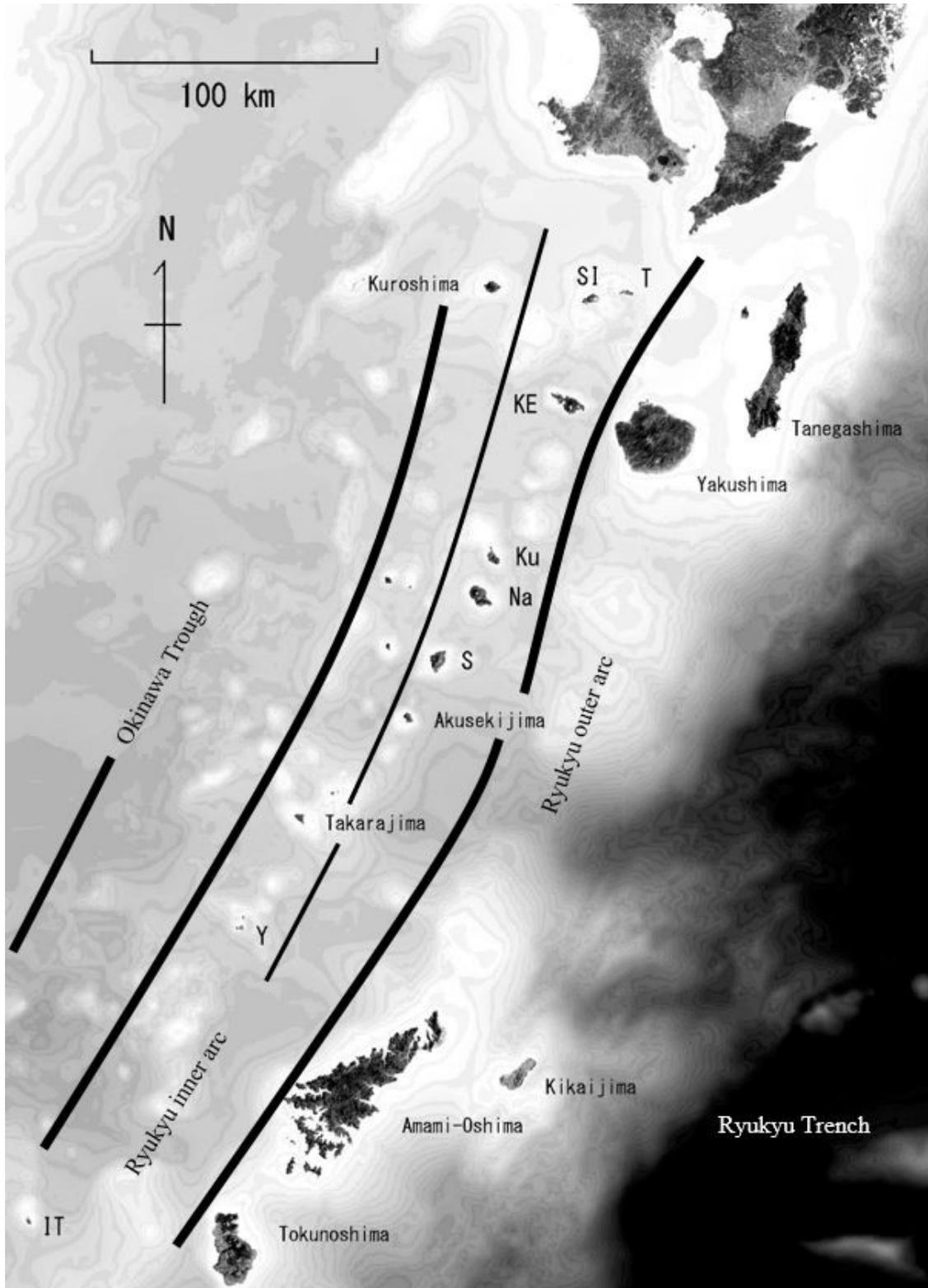


図 4-2 南西諸島の地形・地質概略図（可視画像，海深の濃淡図），（坂本・木下，2014）. SI：薩摩硫黄島，T：竹島，KE：口之永良部島，Ku：口之島，Na：中之島，S：諏訪之瀬島，Y：横当島，IT：硫黄島

る島嶼である種子島・屋久島・奄美大島・徳之島が並び、さらにその西側に第三紀および第四紀火山岩によって形成される琉球内弧の島嶼が北東―南西の方向に延伸していることが識別できる。この琉球内弧は二分することができ、琉球弧の火山フロントにあたり、現在でも活動的な火山活動を続けている場合が多い新期火山列である口之永良部島・口之島・中之島・諏訪之瀬島・悪石島・横当島・硫黄島と、火山フロントの西側に位置し、現在では大規模な火山活動が見られない旧期火山列である黒島・臥蛇島・小臥蛇島・平島・宝島・小宝島に細分することができる（木崎，1985；Matsumoto，1943；波多江，1955；小西，1965；松本，1983）。新期火山列の中に存在する諏訪之瀬島は、御岳火山を有し、その東側には特徴的な馬蹄形カルデラが存在する。この諏訪之瀬島火山は200年間で8回以上の大きな噴火をしており（井村，1991），現在の北部琉球弧の中で最も活動的な火山である。また旧期火山列の一部の島嶼では噴気活動等が報告されており、そのK-Ar年代から1万年以内に噴火している可能性も考えられている（中野・下司，2008）。さらにこの旧期火山列は、安山岩が主体となってできた黒島・臥蛇島・小臥蛇島、そして平島と隆起サンゴ礁による段丘地形が発達している宝島・小宝島に分けることができる（木庭ほか，1979）。

本章では、こうした九州地方の火山地形の特徴をNIR画像・NIR 3D画像を用いて考察し、一部で可視画像との比較もおこない、教育利用への可能性を検討する。

#### 4.2.2. 両子山火山群

図4-3に、国東半島両子山火山群の可視画像（図4-3-a）とNIR画像（図4-3-b）を示す。国東半島は、別府湾の北側に位置する半径約30kmの円形状をした半島である。溶岩ドーム群と火砕流台地、および火山麓扇状地からなる（松本・成重，1985；鎌田ほか，1988；伊藤ほか，1997）。この両子山火山の活動時期は、前期更新世の1.2-1.5Ma前（鎌田ほか，1988；伊藤ほか，1997）であることから、第四紀火山の中では比較的形成年代が新しくない。

国東半島を可視画像（図4-3-a）で識別すると、両子山火山（標高720.5m）を中心に両子山火山群が広がり、その周辺には発達したガリーが両子山を中心として放射状に伸びていることが認識できる。植生の影響が強く、細かい地形は認識しづらいが、NIR画像（図4-3-b）では、植生が画像へ与える影響が可視画像と比較すると小さいために、より鮮明に放射状に広がるガリーを識別できる。また溶岩ドームや火山麓扇状地も鮮明に識別するこ

とができる。それゆえ NIR 画像はこの開析した地形を細かく明確に認識することができる特徴を有することから火山地形教育学習に用いやすいといえる。また防災や防災教育への活用も可能であり、現在ではすでに火山防災や火山防災教育等への活用研究が始まっている（坂本，2006；坂本ほか，2006）。

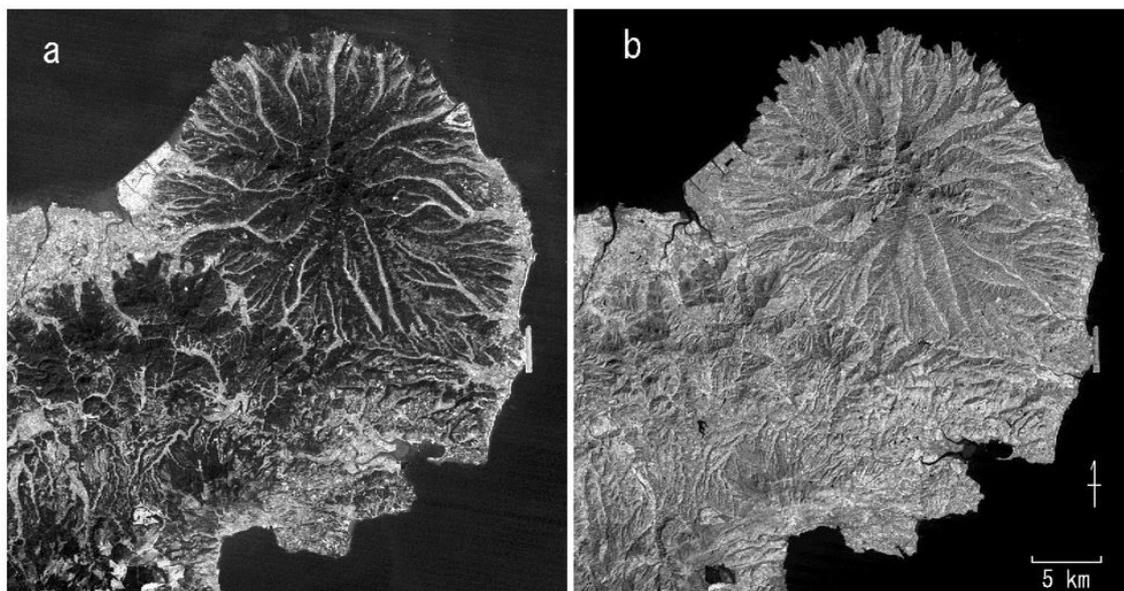


図 4-3 国東半島の両子火山群 (a)：可視画像，(b)：NIR 画像

#### 4.2.3. 鶴見・由布火山群と九重火山群

阿蘇山の北東 25 km に位置する九重火山群を中心に、両子山火山群、鶴見岳火山、由布岳火山、阿蘇カルデラおよびその中央火口丘を NIR 画像で識別したものが、図 4-4 である。ここでも両子山火山群や多良岳火山群同様に、画像に対して植生の影響が小さいため、火山地形を鮮明に視ることができる。図 4-4 では、別府湾北方の両子山火山群から南西方向に向けて、由布・鶴見火山群、九重火山群、および阿蘇カルデラが一行に並んでいることが認識できる。由布岳・鶴見岳、九重火山、阿蘇火山、そして雲仙岳と続く別府一島原地溝（松本，1979）は、九州北部を島原半島に向け、幅 30 km 程度の地溝状の陥没地帯であり、低重力地域として特徴づけられているが、NIR 画像を用いて視ると、その陥没の様子が概観できる。

九重火山群は、豊肥火山群の中で新しい火山群であり、E-W 方向に 15km に分布する 20 以上の火山の集合体として、猪牟田カルデラの中に存在する（鎌田ほか，1988）。久住山

南方の飯田高原や九重火山群を直上から下へ見た NIR 画像が図 4-5，南から北に向けて俯瞰した NIR 3D 画像が図 4-6 である。図 4-5 の NIR 画像では，久住山の南方の高原に火砕流堆積物がつくった平坦面が広がり，それが侵食によって下方への開析した痕跡が認識できる。図 4-6-b でもその痕跡が明瞭に俯瞰でき，火山地形の特徴が明瞭に出ている。九重火山群の活動はおよそ 0.14-0.15Ma に活動を始めたことがわかっており（小野ほか，1977），第四紀火山中では比較的形成年代が若い。それゆえ他の画像と比較すると下方への開析が少ないことも識別できる。このように地形が持つ地質的特徴も NIR を用いることによって画像へ反映させることができる場合があり，NIR 画像は，学校教育において地形・地質学習をおこなう場合，有効な教材となりうる。

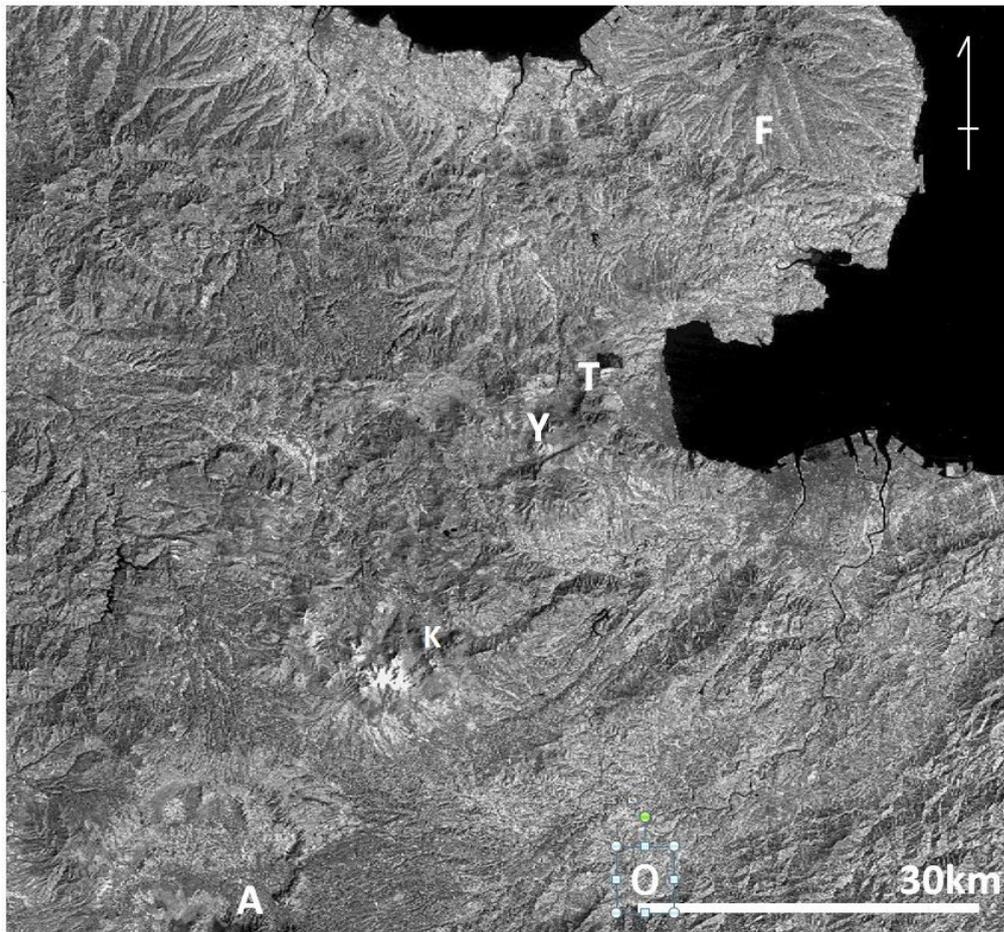


図 4-4 両子山火山群，九重火山群，及び阿蘇カルデラの NIR 画像 F：両子山火山群，T：鶴見岳火山，Y：由布岳火山，K：九重火山群，A：阿蘇カルデラおよび中央火口丘

文部科学省（2009）によると，教育の中で「地理 A」「地理 B」「科学と人間生活」「物理」「地学基礎」「地学」などの科目を実施するにあたり，防災について触れなければならないと明記されている。その際にどのような教材を活用して学習を進めるかはある程度担当する教師の裁量に委ねられているが，この NIR 画像は，全国のどの地域であっても画像を取得することができるため，地域に根ざした火山防災教育を展開することができる教材となりうるものである。

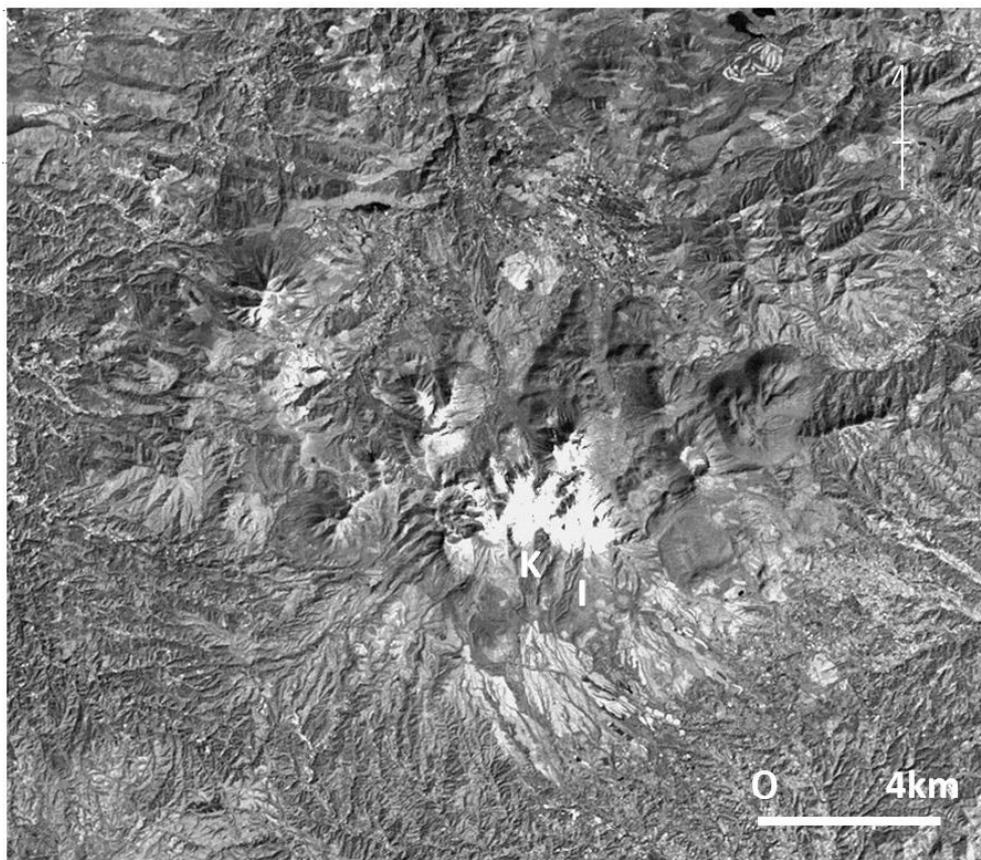


図 4-5 九重火山群の NIR 画像 K：久住山, I：稲星山

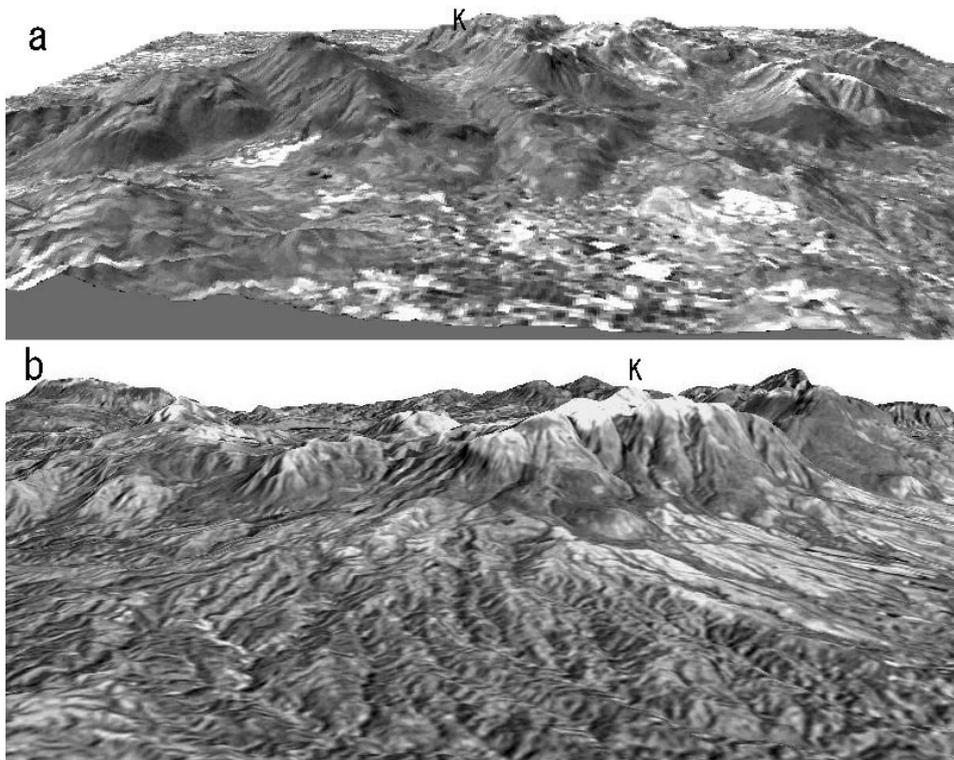


図 4-6 九重火山群の 3D NIR 画像 (a): 北から南を俯瞰, (b): 南から北を俯瞰. K: 久住山

#### 4.2.4. 阿蘇カルデラと阿蘇火山群

巨大な陥没カルデラである阿蘇カルデラは、中央火口丘を中心として東西 18 km、南北 25km の大きさを持ち、日本で有数の規模を持つ（小野ほか，1996）。図 4-7、図 4-8 に NIR 画像および NIR 3D 画像を示す。これらの画像では、日射による陰影によって大規模なカルデラ地形と中央火口丘が明瞭に識別できる。地形を大局的に学習・理解するには NIR 画像および NIR 3D 画像は活用しやすいといえる。

図 4-9 に示したカルデラ西壁の NIR3D 画像では、北壁と南壁の境界である立野火口瀬が明瞭にわかる。その立野火口瀬からは白川が蛇行しながら西へ流れている様子がわかる。この火口瀬には北落ちの正断層である布田川断層が走っている（千田，1979）。この図を俯瞰してわかるように NIR 3D 画像では断層地形も明瞭に識別でき、これは断層地形学習に対しても有効である。

図 4-10 は阿蘇中央火口丘を北西方向から俯瞰した NIR 3D 画像である。阿蘇カルデラの中央部に位置する中央火口丘は、多数の成層火山や火砕丘、溶岩流から形成されている（小野・渡辺，1985）。この中央火口丘は東西方向に配列し、その中に高岳（海拔 1592m）、中岳（海拔 1506m）などが存在する。

直上から見た画像は火山地形を大局的に理解するのに有効であるが、火山地形の高低差や凹凸といった立体的な地形的特徴を画像で視る場合は、図 4-8～図 4-10 の NIR 3D 画像によって俯瞰できるように、その対象物の地形を立体視し、デフォルメすることが有効である場合がある。今回画像作成に用いた SiPSE では、目標とする地形をどの方向からも立体視することができ、また標高差と水平距離の比率である縦比を 2 倍まで変化させ、高さを強調することもできる。そして表示倍率の異なる 3D 画像を容易に作成することができる操作性を有する。SiPSE で作成した NIR 画像は Joint Photographic Experts Group (JPEG) 形式であり、さまざまな加工がしやすく、画像上にラインを入れる作業が容易にできる特長を有する。図 4-8 では阿蘇カルデラの周囲を取り巻く外輪山が明瞭に俯瞰でき、このようにカルデラの特徴を把握するのに適した画像を取得できる。これらの画像は実像ではなく、デフォルメされたものであるが、地形の特徴を強調する学習教材としては有効であり、指導方法を工夫することによって効果的な火山地形学習をおこなうことができるようになる。

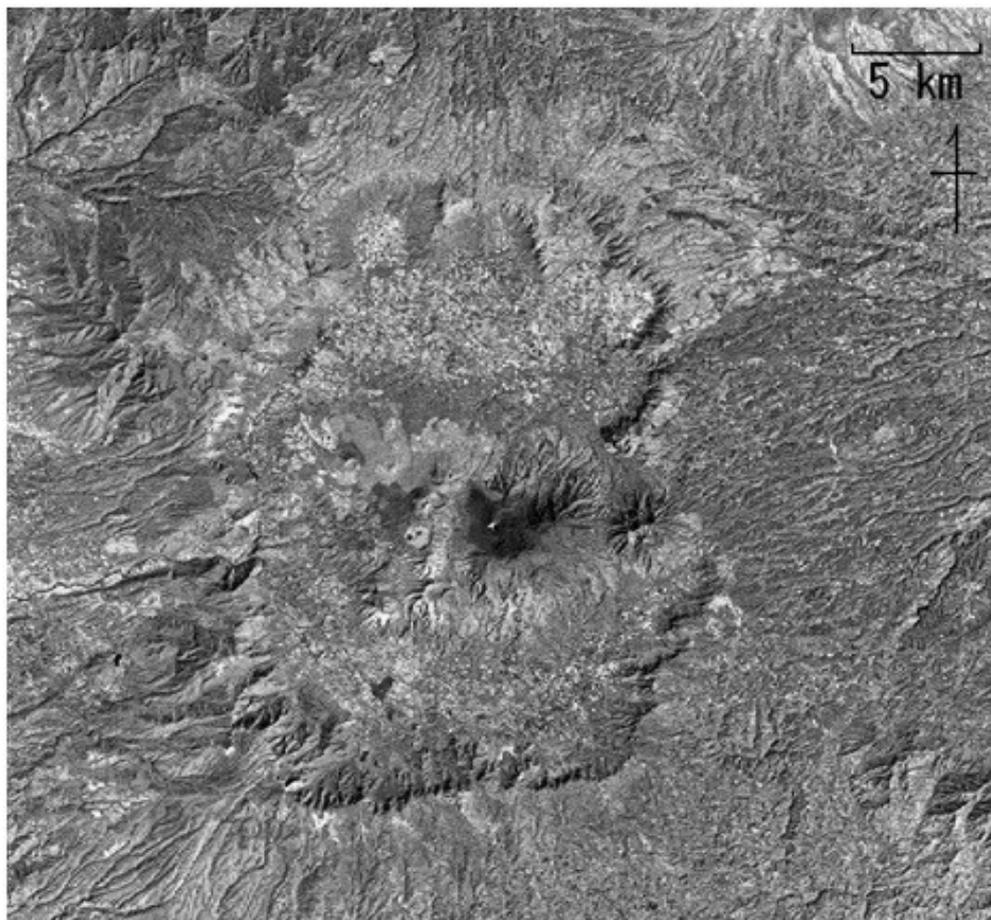


図 4-7 NIR 画像で概観した阿蘇カルデラ

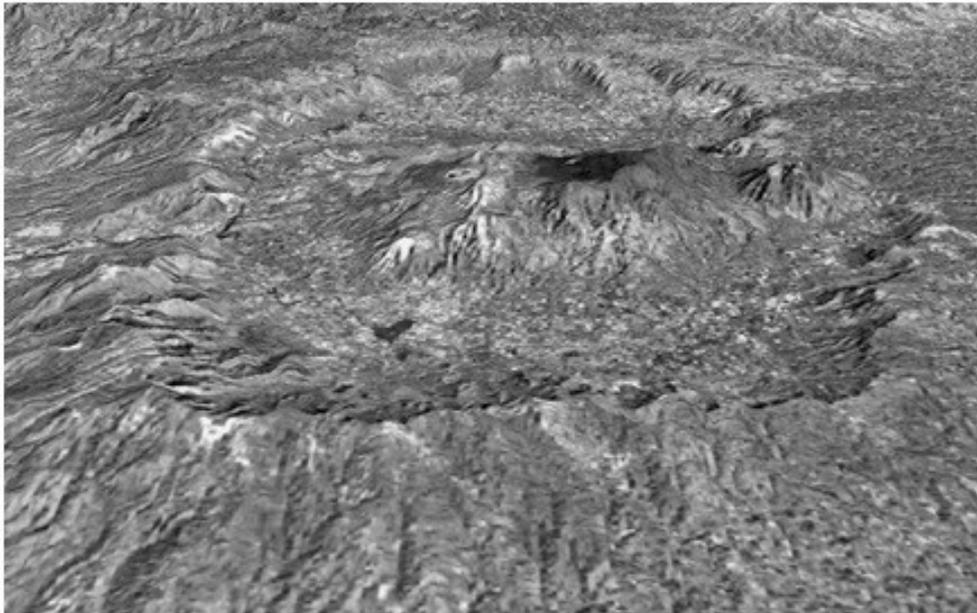


図 4-8 南から俯瞰した阿蘇カルデラ NIR 3D 画像

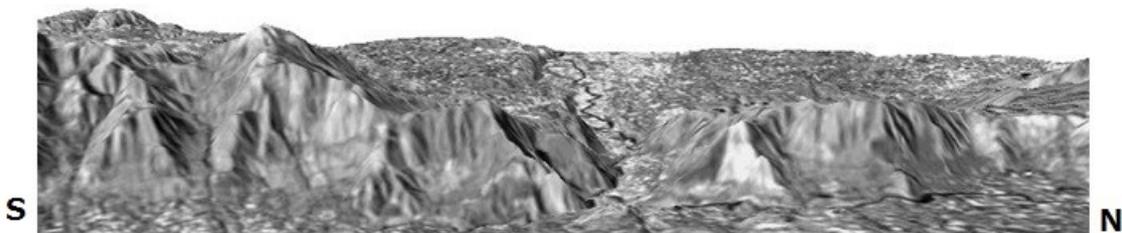


図 4-9 阿蘇カルデラ西壁の NIR 3D 画像（北壁と南壁を分離する場所が立野瀬：河川は白川）

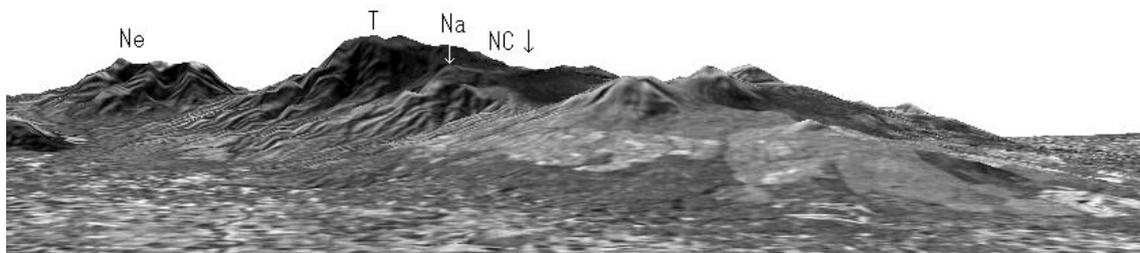


図 4-10 北西方向から俯瞰した阿蘇カルデラの中央火口丘の NIR 3D 画像（Ne：根子岳，T：高岳，Na：中岳，NC：火口）

#### 4.2.5. 多良岳火山群

図 4-11 に示す大村湾と有明海の間に存在する多良岳火山は、九州の北西部、大村湾と有明海の間に存在し、小形（1989）、小形・高岡（1991）によって、約 0.4Ma-1.0Ma 前に活動していた成層火山であることがわかっている。山麓には溶岩ドームやスコリア丘などの側火山も多くみられる。多良岳（標高 983m）、経ヶ岳（1075m）、五家原岳（1057m）を中心にした多良岳火山群を NIR 画像（図 4-11-b）で視ると、国東半島の両子火山群同様、著しく下方への開析が進み、放射状にガリーが発達していることが日射の陰影で識別できる。しかし両子山火山群と比較すると、形成年代が若いために、開析が進行しておらず、ガリーの谷底が狭い。それゆえ図 4-11-a の可視画像で視ると、植生に遮られガリーの識別が限定される。しかし NIR 画像では、植生に影響されることが小さく、ガリーが鮮明に識別できる。

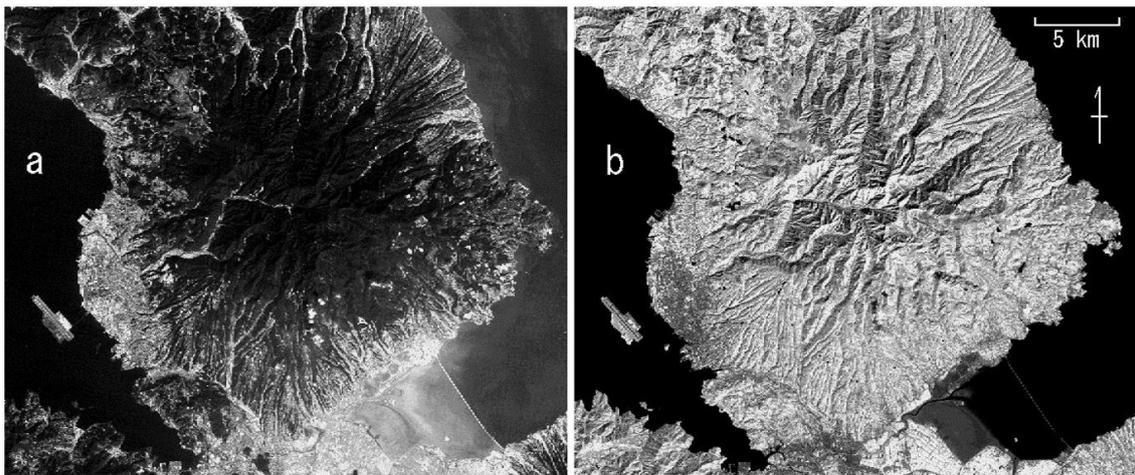


図 4-11 多良岳火山群 (a)：可視画像, (b)：NIR 画像

#### 4.2.6. 雲仙火山

東西 20km、南北 25km の大きさである雲仙火山は、面積的には島原半島の多くを占める（図 4-12-a, b）。東西方向の正断層を数多く持ち、別府－島原地溝の一部であるとされている（星住・宇都，2000）。図 4-12-b の NIR 画像でもその断層がはっきりと識別できるが、NIR 画像を 3D 化した図 4-13 では、千々石断層の断層地形を図 4-9 の布田川断層と同様に、よりいっそう明瞭に俯瞰することができる。

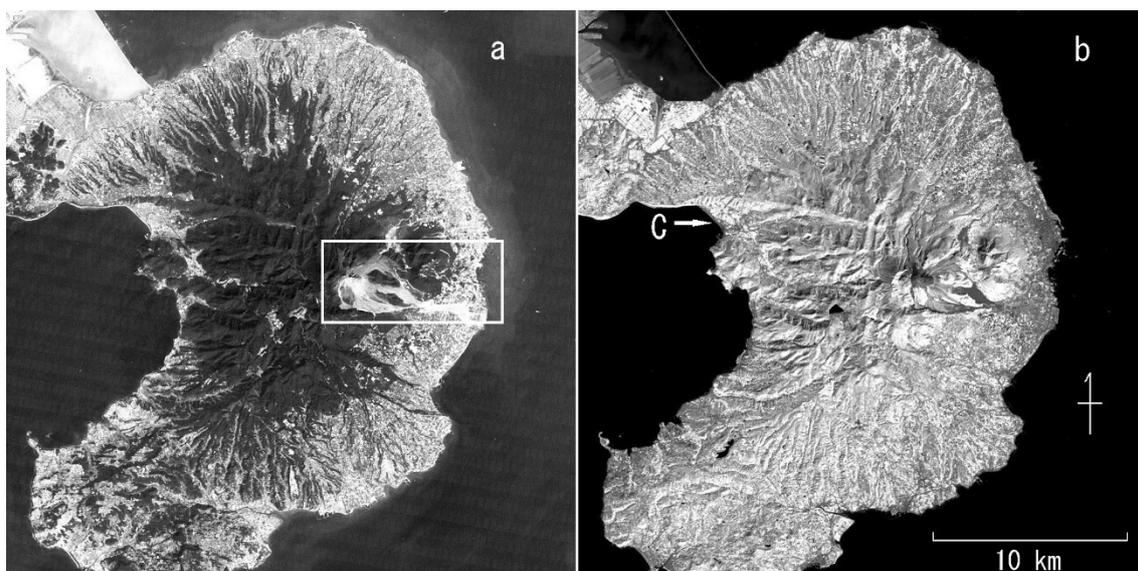


図 4-12 島原半島にある雲仙火山. (a): 可視画像, (b): NIR 画像. 白フレームの中に雲仙普賢岳の溶岩ドームと火砕流の跡を視ることができる. また NIR 画像では千々石断層(C)を明瞭に識別することができる.

1792年の地震によって眉山・天狗山の東斜面の山体が崩落した。これにより  $4.4 \times 10^8 \text{ m}^3$  の土量が有明海に崩れ落ち、津波を発生させ、対岸の熊本側で1万人を超える死者を出す災害となった（井上，1999）。岩屑流が形成した島々が九十九島と呼ばれ現在でも残っていることが、図 4-14 の NIR 3D 画像でも認められる。

雲仙普賢岳は、1990年から噴火活動が本格化し、1991年に人的被害を出した。その後1995年まで噴火活動が継続し、その間度重なる火砕流および土石流を発生させた。また、9,400回以上もの火砕流が発生し、火山学者・報道関係者を含む43人も人命を奪った（杉本・長井，2009）。火砕流のうち、数回は移流距離が4kmを超えているが、溶岩ドームの東の水無川および北東の千本木地区に向かった流路の痕跡は、可視、NIR画像で識別することができる（図 4-12，図 4-14）。

図 4-12 で視ることができるように、可視画像では雲仙普賢岳における火山災害の痕跡も植生が回復することによって識別しづらくなっている。しかし NIR 画像及び NIR 3D 画像ではこの影響も小さく抑えることができ、その火山が噴火することによって形成された地形を容易に識別することができる。こうした情報工学を利用して製作された SiPSE を用い、郷土で発生した火山災害の特徴を学習者が認識することによって高い火山地形学習や防災学習の教育効果を期待することができる。

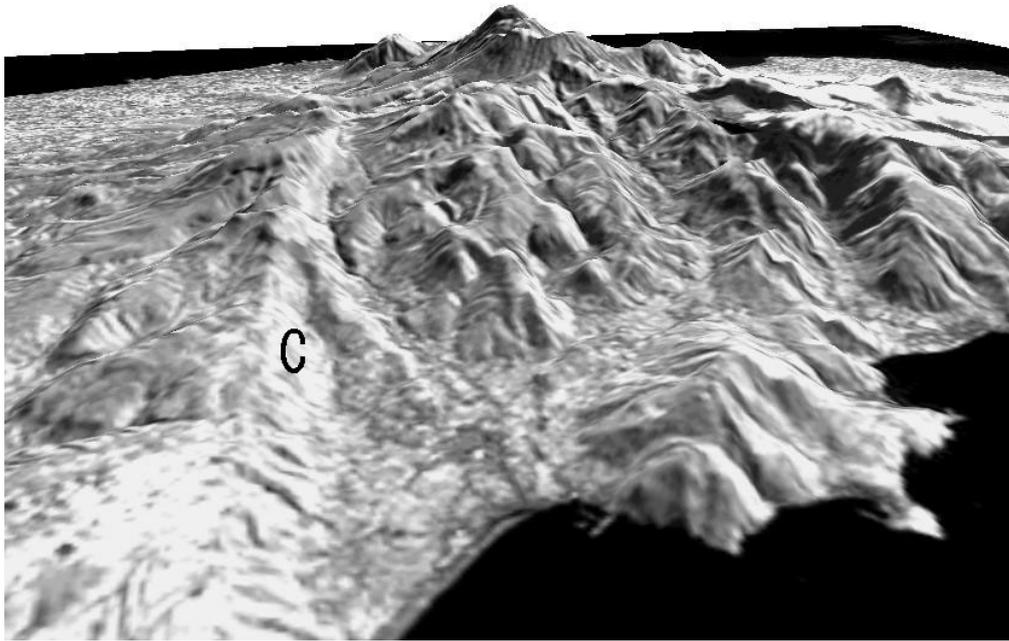


図 4-13 島原半島を西から東へ見る NIR 3D 画像. C : 千々石断層

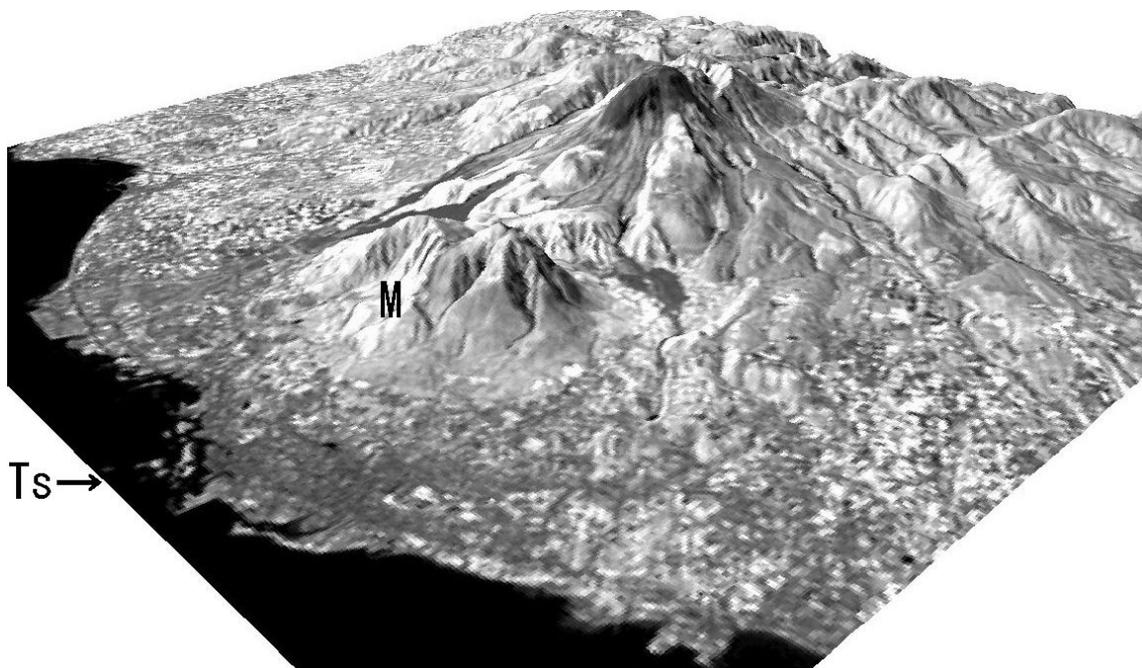


図 4-14 北東から雲仙火山と島原半島を俯瞰した NIR 3D 画像. (M) : 眉山, (Ts) : 九十九島の位置関係, 普賢岳から移流した火砕流痕がよくわかる

#### 4.2.7. 加久藤・小林カルデラと霧島火山群

霧島火山群は加久藤カルデラの南東縁に位置し（町田ほか，2007），大小 20 の単成・複成火山からなる（図 4-15）。北西から飯盛山，栗野岳，韓国岳，新燃岳，高千穂峰，御池などの火山が北西－南東方向 30km，北東－南西方向 20km の範囲に存在している。NIR 画像では複数存在する火山の火口や山体の大きさなどを明確に把握することができる。

鹿児島地溝（露木，1969）の北縁に位置する加久藤カルデラは，最終的に約 33 万年前の噴火によって形成され，形成後にカルデラ湖が出現した。その後このカルデラ内に堆積した湖成層は，河川によって下刻され，そこに段丘地形が形成された（荒牧，1968）。現在の加久藤カルデラにおいて，数段の河岸段丘地形が発達していることが図 4-16 から俯瞰できる。この画像は縦比を 2 倍に強調しているが，京町から南に向かって流れる川内川の東岸に発達した河岸段丘が存在することがわかる。ここでも断層地形同様，段丘地形の特徴も縦横比を変化させることによって学習することができる。学校教育の中で，野外活動が減少しているため，実際に地形観察をおこなう機会は非常に少なく，これを補完するのに有効な教材である。

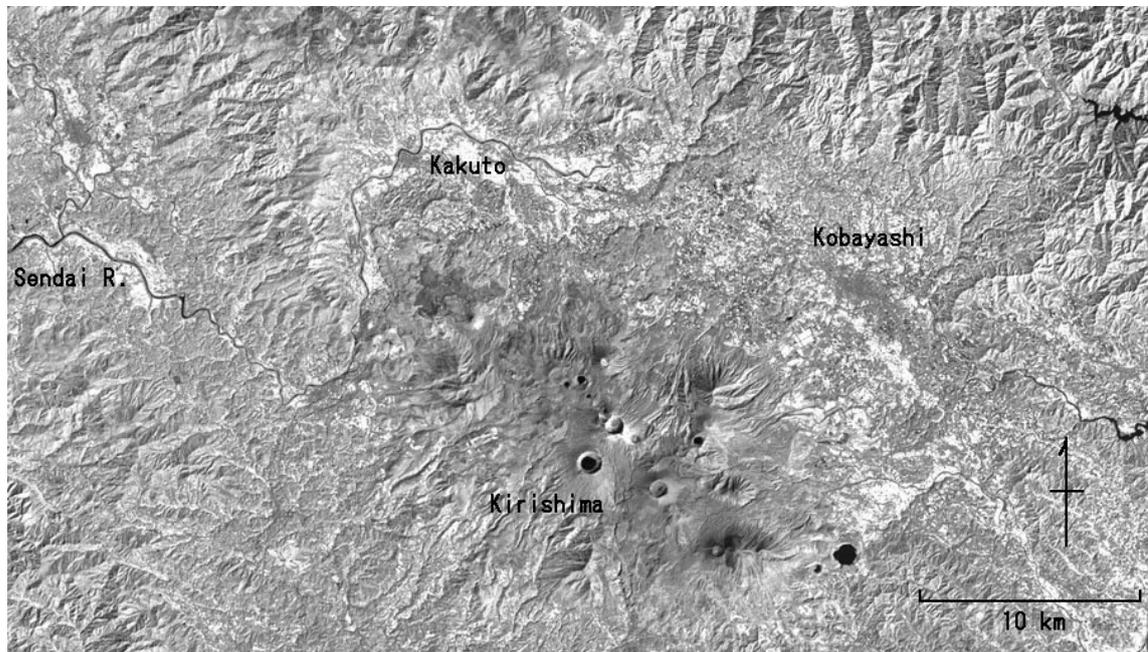


図 4-15 加久藤-小林カルデラと霧島火山群の NIR 画像(北西部を流れるのは川内川)

加久藤カルデラの東に隣接する小林カルデラは，加久藤火砕流や入戸火砕流に厚く覆われており，火山地形としての顕著な特徴は見られない。NIR 画像では地形を構成する岩石

や鉱物，堆積物を識別することはできない。火砕流堆積物による特徴的なガリーなどが侵食によって開析した場合等は明瞭に認識することは可能であるが，他の火砕流堆積物に覆われた小林カルデラの特徴は識別することができない。

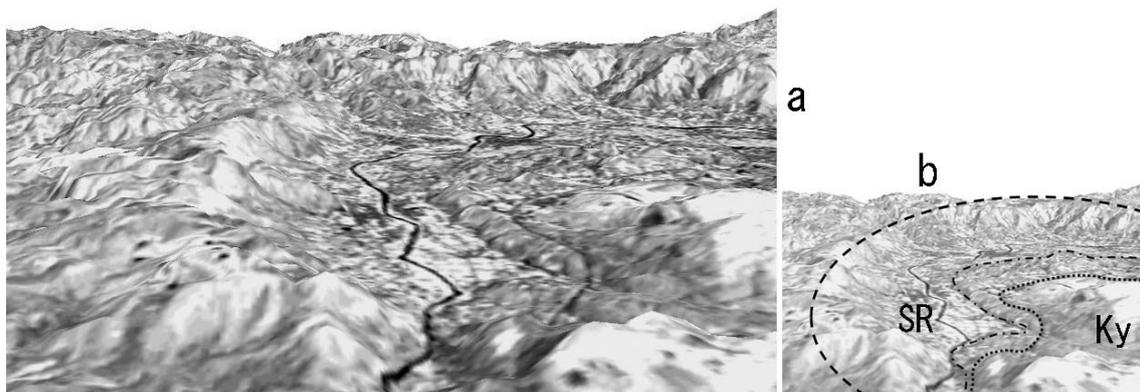


図 4-16 (a)：南から俯瞰した加久藤カルデラ西側地域の NIR 3D 画像，(b)：破線は加久藤カルデラ壁の頂点を示している。SR：川内川，Ky：京町台地と河岸段丘

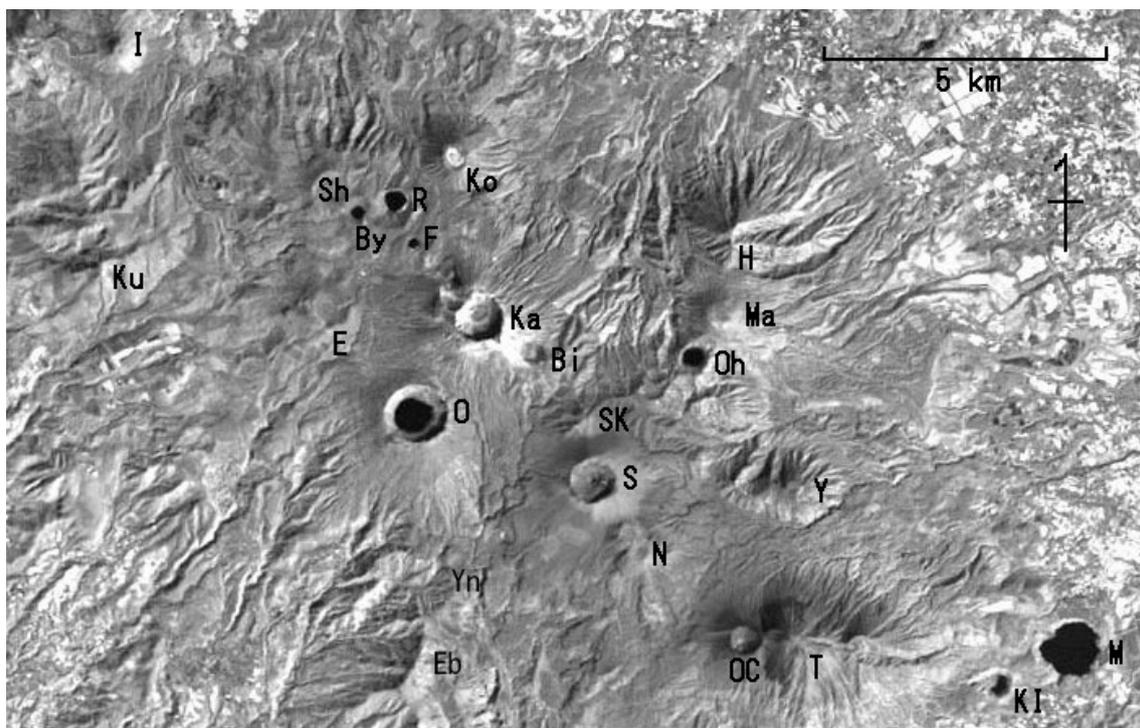


図 4-17 霧島火山群の NIR 画像 (I：飯盛山，Ku：栗野岳，Sh：白鳥山，By：白紫池，E：えびの岳，R：六観音御池，F：不動池，O：大浪池，Ko：籾岳，Ka：韓国岳，Yn：湯之谷岳，Eb：烏帽子岳，Bi：琵琶湖，SK：獅子戸岳，S：新燃岳，N：中岳，Oh：大幡池，H：夷守岳，Ma：丸岡山，Y：矢岳，OC：御鉢，T：高千穂峰，KI：小池，M：御池)

霧島火山群の古期火山群に属する栗野岳，湯之谷岳，烏帽子岳，獅子戸岳，矢岳などは，西側に偏って存在しており（Kobayashi et al., 1981；井村, 1994），これらは明瞭な火口を持たない（図 4-17）。それに対し新期火山群に属する大浪池，韓国岳，新燃岳などの火山は大きな火口を，御池，不動池，六観音御池，百紫池などの火山は，マール（爆裂火口）が存在することで特徴付けられる。図 4-17 の NIR 画像で火山地形を視ると，植生や人工物が画像に対して与える影響は小さく，火口の形状や下方へ侵食されたガリーといった火山地形の特徴が明瞭に画像に出ている。図 4-18 は霧島火山群を南西から示した NIR 3D 画像である。これも火口や侵食された地形を明瞭に判読することができる。

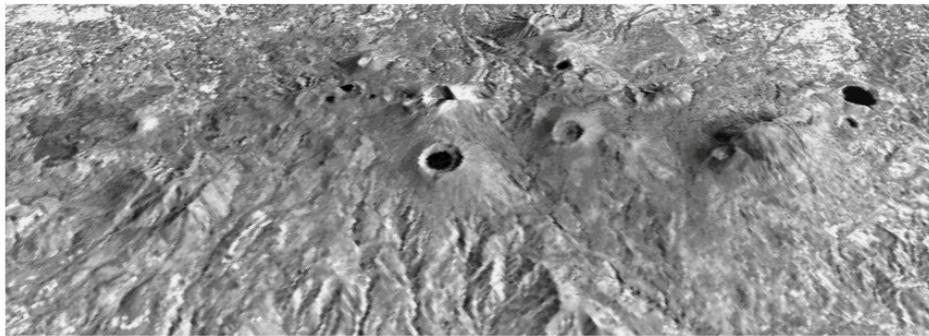


図 4-18 南西方向から俯瞰した霧島火山群の NIR 3D 画像

#### 4.2.8. 始良カルデラと桜島火山

始良カルデラは，鹿児島地溝の中部，鹿児島湾の北部に位置する，およそ 20km 四方の巨大カルデラである。鹿児島湾を北方から俯瞰した NIR 3D 画像を図 4-19 に示す。これにより南北方向に伸びる鹿児島地溝（露木，1969）を俯瞰することができる。また鹿児島湾東側の大隅半島牛根地区にあるカルデラ急崖を識別することができる。このカルデラ急崖は高隈山地西縁部にあたり，NIR 画像ではそれが明瞭に識別できる。

始良カルデラは，現在から約 2 万 9000 年前（奥野，2002）に最新の大規模な火砕流噴火をした。この噴火によって南九州に広大な火砕流台地（シラス台地）が形成され，これに伴って飛散した降下火山灰は広く日本列島で認められている（町田・新井，1992）。シラス台地は，南九州を代表する火山地形であるが，火砕流堆積物が非溶結であることから，崩壊・土石流災害等の原因の一つにもなっており，鹿児島湾周辺に居住する地域住民にとって，この地形と災害に関する理解と，防災スキルの向上は必要である。

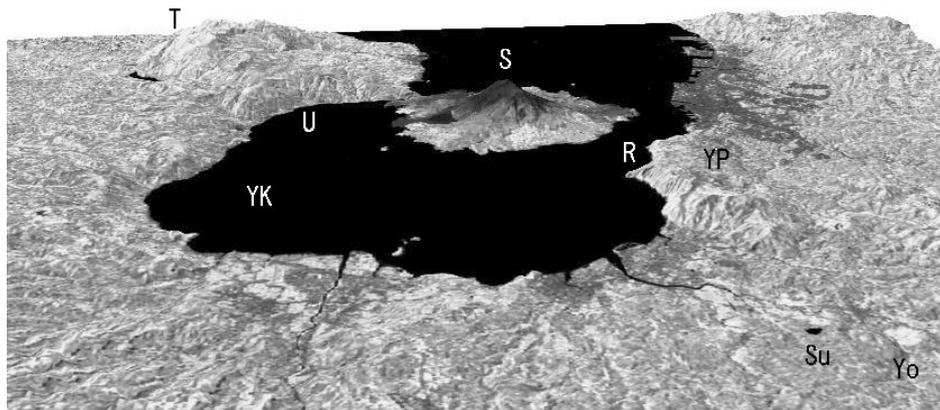


図 4-19 北から南に向けて始良カルデラおよび鹿児島湾を俯瞰。T:高隈山, U:牛根, YK:若尊, S:桜島火山, R:竜ヶ水, YP:吉野台地, Su:住吉マール, Yo:米丸マール

桜島火山は、始良カルデラの南端に位置し、その南岳（1040m）および昭和火口から連続的に火山ガスや噴煙が放出されている。2011年は996回、2012年は885回の爆発的噴火が発生している（鹿児島地方気象台、2013a）。また小規模な火砕流も発生しており、火山防災の面からも大きく注目されている。桜島火山のNIR画像（図4-20-a）およびNIR 3D画像（図4-20-b）を示す。NIR画像では、植生のある場所は白く、植生のない場所は黒く識別できる。図4-20-aを見ると、1946年のいわゆる昭和噴火でできた溶岩上（Sy）では、その色別によって植生が少ないことがわかる。また1914年のいわゆる大正噴火でできた溶岩原（Ty）はグレー色になっており、植生が回復してきていることが識別できる。また桜島火山の山頂付近は、高濃度の火山ガスの影響等によって植生がなく、画像では黒色になっている（木下、2003）。飯野ほか（2004）では、三宅島の2000年噴火前後の衛星画像解析と近赤外バンドと可視バンドの差をそれらの和で割って規格化した植生指数によって、活動的な火山における植生の回復度が判断している。土石流や火山ガスにより、地表を被覆している火山性の堆積物や植生の変化が著しい桜島火山の場合では、そこに自生する植生の回復度はこのNIR画像の黒色の濃淡によっておおよそ判断することが可能である。

鹿児島湾北西部に竜ヶ水地区がある。鹿児島県全体が大量の雨に見舞われ、鹿児島市寺山では日降水量300mmを超え、郡山地区では402mmという雨量となった（細山田、木下、1994）。この短時間に発生した大量の降雨のため、竜ヶ水地区とその背後の急崖では大規模な土石流災害が発生した。NIR 3D画像によって吉野台地と竜ヶ水を俯瞰する（図4-21）と、背後の急崖を俯瞰することができる。SiPSEでは災害学習をする際に、災害の

発生場所をすぐに俯瞰し、その地形の特徴を把握できるため、児童・生徒は郷土で発生した災害と地形の関連を教室で理解することが可能である。

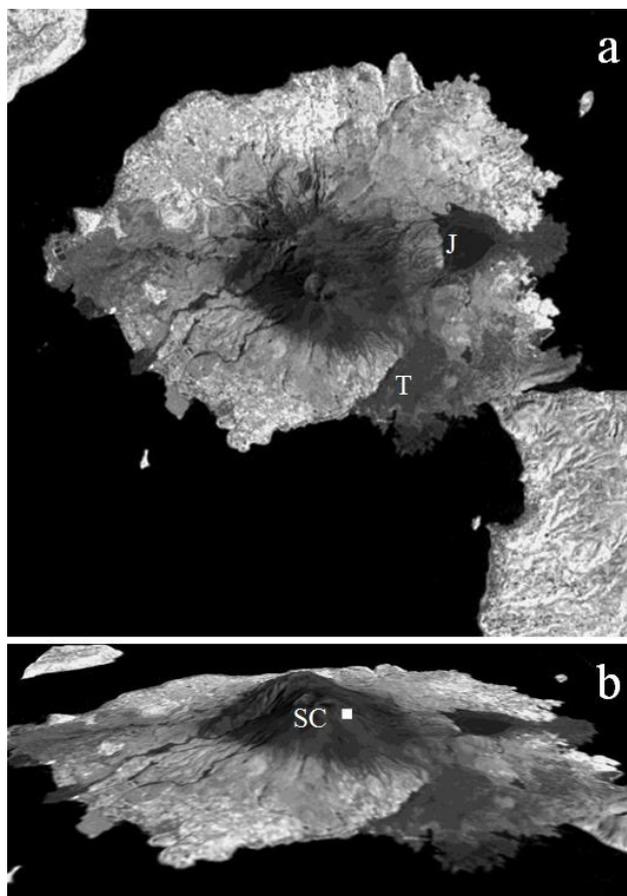


図 4-20 (a)：直上から見た桜島火山の NIR 画像，(b)：南方向から俯瞰した NIR 3D 画像。J：地獄河原，T：大正溶岩，SC：昭和火口。

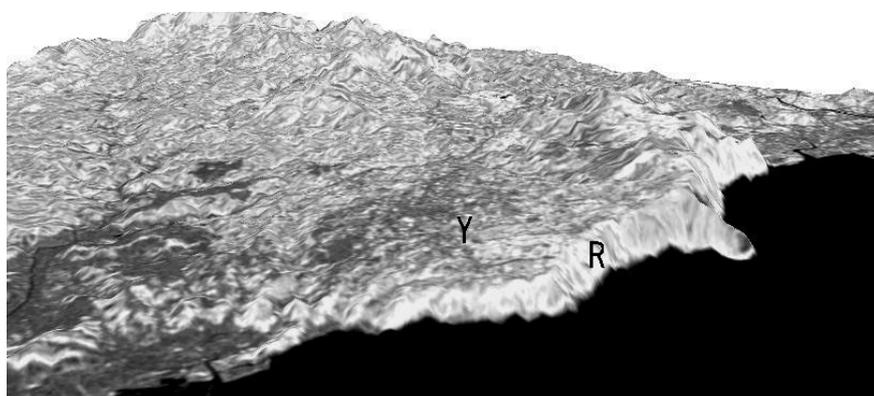


図 4-21 鹿児島湾北西部の NIR3D 画像。R：竜ヶ水，Y：吉野台地

#### 4.2.9. 阿多カルデラと指宿火山群

阿多カルデラは鹿児島地溝の南端に位置し、様々なタイプの火山が集まっている (Matsumoto, 1943 : 宇井,1967)。この阿多カルデラには2つのカルデラ (A, B) が存在し、阿多北部カルデラ、阿多南部カルデラと呼ばれる場合がある (図 4-22) (町田ほか, 2007)。

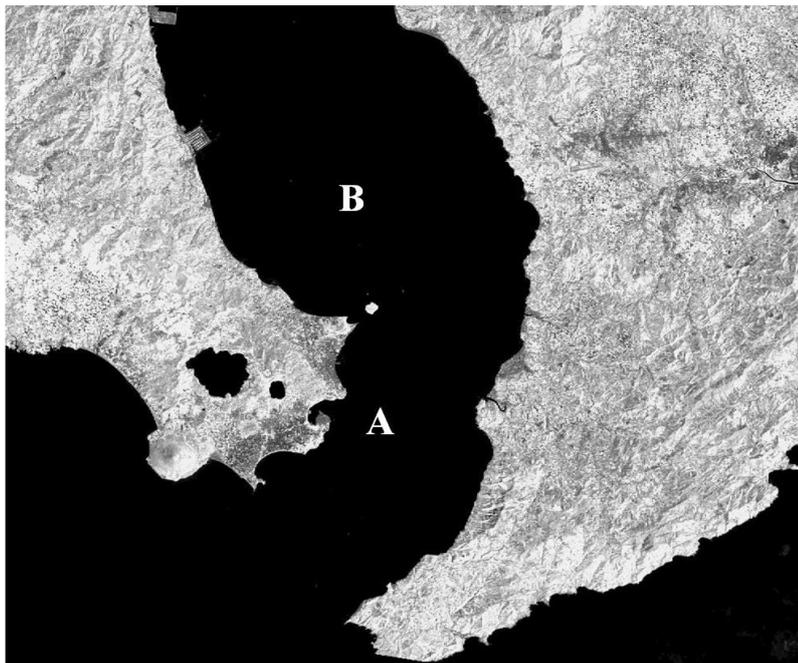


図 4-22 阿多カルデラ周辺の NIR 画像. A : 阿多南部カルデラ付近, B : 阿多北部カルデラ付近

後期更新世初期に噴出した阿多火砕流は、薩摩・大隅両半島に広く分布しており、その供給源は、Matsumoto (1943) によって推定された指宿を中心とするカルデラ (阿多南部カルデラ図 4-22-A) よりも北側の鹿児島湾央 (阿多北部カルデラ, 図 4-22-B) とされている (荒牧・宇井, 1966)。

NIR 3D 画像によって阿多南部カルデラの急崖は、池田湖の西側に明瞭に認められる (図 4-23)。その外側には阿多火砕流堆積物が大量に堆積している。このような地形とその内部に様々な単成火山があることから阿多カルデラが提唱された (Matsumoto, 1943)。阿多カルデラ内の西端にある池田湖は、周囲 15km のカルデラ湖であり、最深部は 230m を超える。池田カルデラは 6,400 年前に噴火した (奥野, 2002)。この時、体積  $5 \text{ km}^3$  ほどの火砕流が生じ (宇井, 1967 ; 成尾・小林, 1983), 火砕流台地が形成された。NIR 画像では、

池田カルデラ周辺の火砕流台地や、このカルデラから南東方向に直線的に続くマールがよく認められる（図 4-23）。ここでも植生が画像に与える影響は小さく、火山地形を十分に俯瞰することができる。

阿多カルデラの南西に位置する開聞岳は、海拔 922m の標高を持つ成層火山である。溶岩とスコリアによって形成され、頂上部には溶岩ドームが存在する（藤野・小林，1997）。開聞岳北東に位置する橋牟礼川遺跡は、縄文時代と弥生時代の新旧関係を証明した遺跡として有名であり、また噴火によって当時の人間生活の様子を保存したことで知られている（成尾ほか，1997）。最近の噴火は 885 年の仁和噴火である。

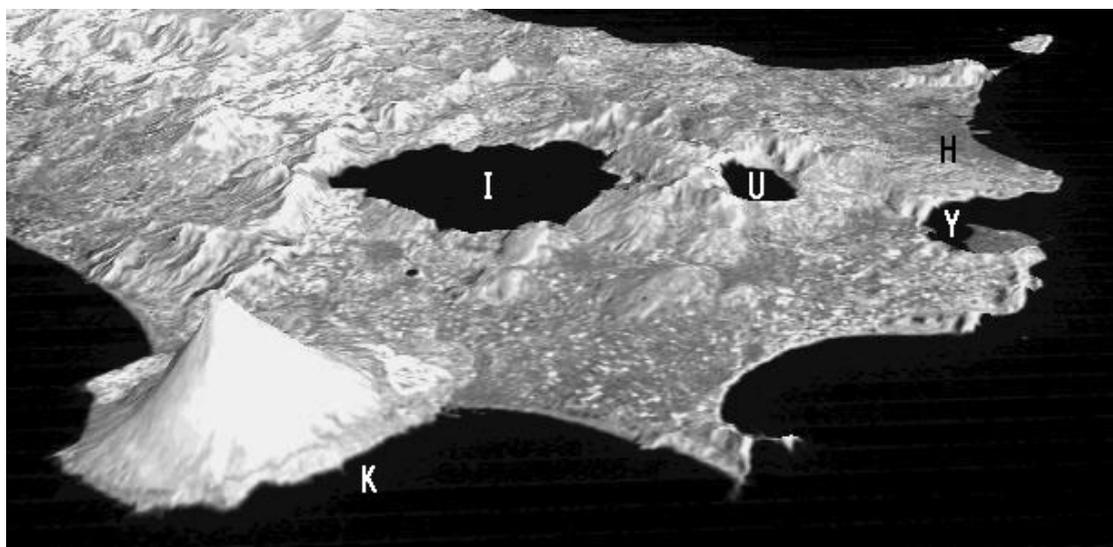


図 4-23 指宿火山群を南から俯瞰した NIR 3D 画像。I：池田湖，Y：山川港，K：開聞岳，H：橋牟礼川遺跡，U：鰻池

この NIR 3D 画像では、縦横比を変化させることによって地形の特徴を強調しているが、こうした操作を SiPSE では児童・生徒であっても容易におこなうことができる。この容易に操作でできることが教育用のソフトウェアには最も必要な機能であり、これを克服できないソフトウェアは多い。

図 4-24 では、大隅半島側に存在するカルデラ壁（Matsumoto，1943）を NIR 3D 画像化したものである。縦の倍率を 2 倍に強調することによってカルデラ壁を明瞭に俯瞰することが出来るようになる。

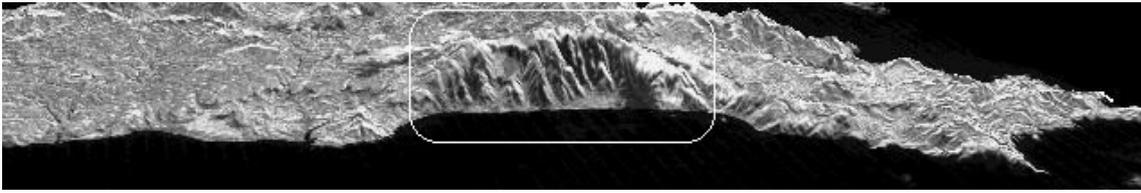


図 4-24 大隅半島を西から俯瞰した NIR 3D 画像. 枠線内が規模の大きいカルデラ壁

#### 4.2.10. 諏訪之瀬島火山

諏訪之瀬島は鹿児島市の南南西約 230 km の地点に位置し、琉球弧の火山フロント上に存在する。その形状は長軸約 8 km、短軸約 6 km である。この諏訪之瀬島には 4 つの火山体が存在しており、それらは北北東－南南西方向に連なっている。1813 年の文化噴火（文化 10 年）による堆積物が広く地表を覆っており、この噴火については嶋野・小屋口（2001）によって詳細に研究されている。近年の特徴的な活動として、2013 年 12 月 26 日～31 日に御岳火口において爆発的噴火が 247 回記録されたことが挙げられる。この期間のうち 12 月 29 日にはそれが 125 回記録されており、火山災害が懸念される火山である（福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台，2014）。これまでも諏訪之瀬島は「近年、噴火活動が繰り返している火山」として指定された 23 火山のひとつであり、内閣府によってその防災対策が進められている（火山防災対策の推進に係る検討会，2012）。

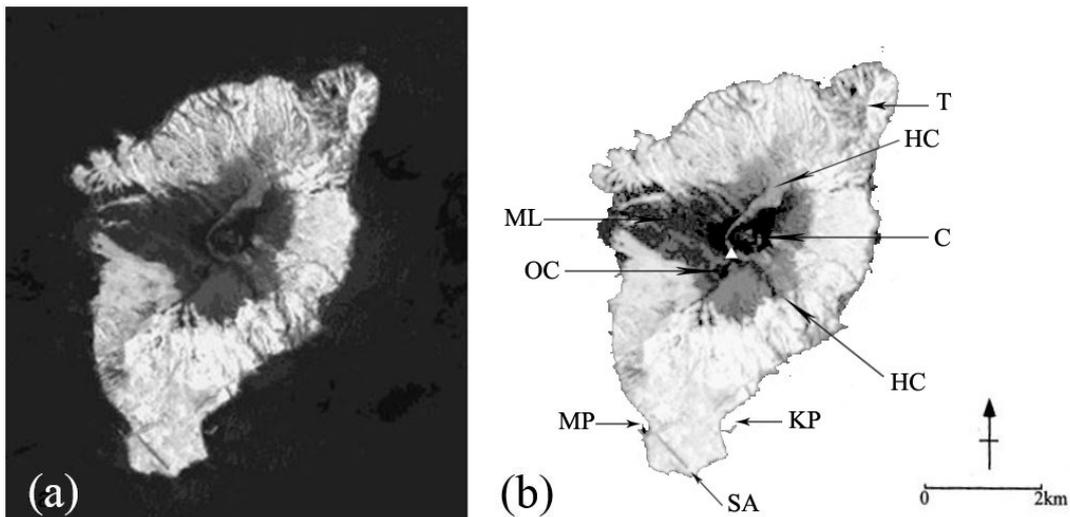


図 4-25 諏訪之瀬島の(a)：NIR 画像と(b)：説明図. T：富立岳，HC：馬蹄形カルデラ，C：御岳火口，

▲：御岳山頂，KP：切石港，SA：諏訪之瀬島飛行場，MP：元浦港，OC：旧火口，ML：明治溶岩

図 4-25-(a)の NIR 画像によって諏訪之瀬島（噴煙の無い 1997 年 5 月 26 日観測）を視ると、御岳火口から噴出される噴煙や火山ガスによって植生が欠如しているため、御岳山頂部から西側の海岸までが黒く見える。これは御岳火口 C から噴出される噴煙や火山ガスの影響と、明治溶岩と火砕流堆積物が西側斜面を覆っているためである。一般に NIR 画像には、陸域内の河川や湖沼、火口湖といった地形や植生の有無などが短い時間で識別できる特長があり、この点は可視画像や地形図より優れている点と言える。図 4-25-(b)の説明図は NIR 画像の黒い海面を白色で置き換え、更に明度を上げて島の東側に開いた馬蹄形カルデラ（作地カルデラ）のカルデラ壁 UC を明瞭にしたものである。その内側に現在活動中の御岳火口 C、外側に旧火口 OC が認められる。また島の北東部に位置する富立岳は急峻な地形を持つ古い火山体だが、図 4-25 では侵食が進み多くの谷が刻まれていることが識別できる。これらの地形的特徴は 3D 画像として俯瞰することによって更に明瞭になる。

図 4-26-(a), (b), (c)に示すように、諏訪之瀬島を東の水平線上と上空から俯瞰すると、東斜面に開いたカルデラ壁や富立岳の急峻な地形が明瞭に把握できる。作地カルデラは 1813-1814 年間の文化噴火の後に崩落した火山地形であり（平沢・松本, 1983；嶋野・小屋口, 2001）、山麓では植生が回復している。

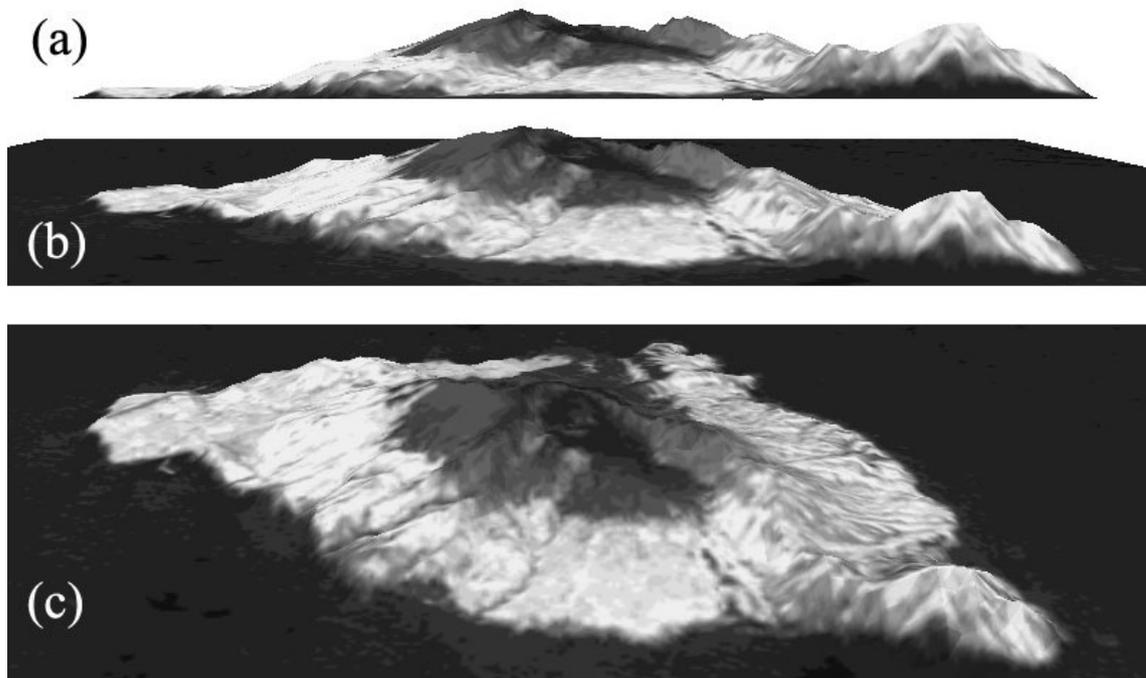


図 4-26 諏訪之瀬島の NIR 3D 画像. (a) : 東の水平線上からの俯瞰, (b,c) : その上空から俯瞰

図 4-27 (1988 年 4 月 15 日観測) では、島の中心に位置する御岳火口から激しく噴煙を上げている様子がわかる。この噴煙は奄美大島の北をかすめて南南東に伸びている。図 4-27-(a)と(b)を比較すると、(a)可視画像は、植生によってガリーや尾根・谷などの細かい地形が識別しづらいが、(b)NIR 画像ではそれが識別しやすい。

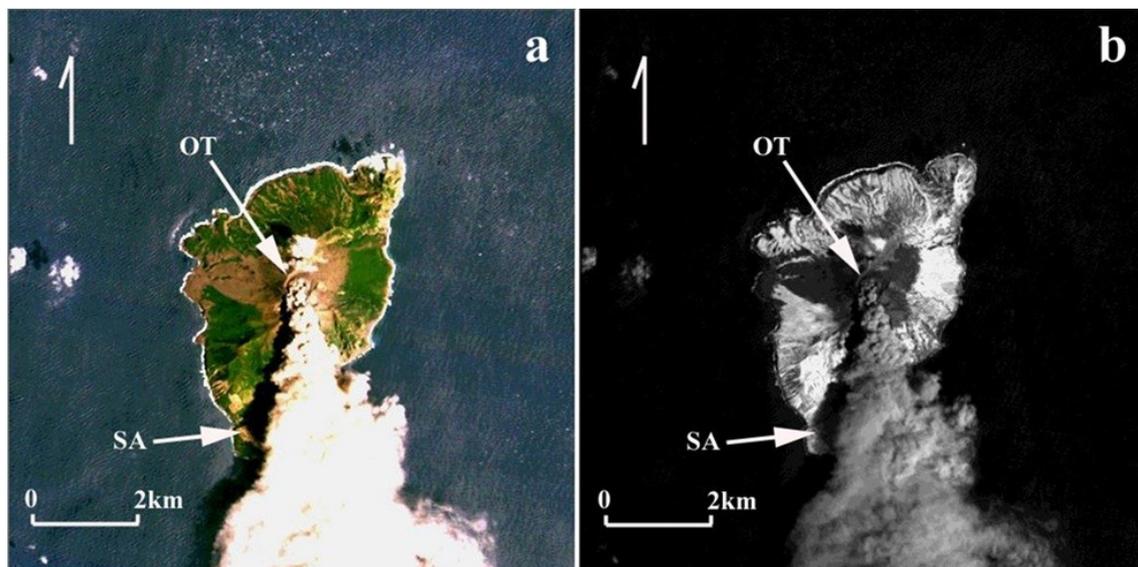


図 4-27 諏訪之瀬島の Landsat-5 TM 画像 (1988 年 4 月 15 日観測). (a) : 可視画像, (b) : NIR 画像.

OT : 御岳火口, SA : 諏訪之瀬島飛行場

#### 4.2.11. 箱根火山

箱根火山は伊豆半島の最北部に位置し、1936年にカルデラ内全域が国立公園に指定された。特異な火山地形を留めており、カルデラ内にある中央火口丘には、成層火山である神山(1438m)や溶岩ドームである駒ヶ岳・浅間山といった火山が存在する(久野, 1972)。図 4-28-a, b に箱根火山の衛星画像の可視画像および NIR 画像を示す。北北西-南南東に続くカルデラ壁西縁とその東部に位置する芦ノ湖、そして中央火口丘を明瞭に識別することができる。図 4-28-a は人工建築物や植生によって、その地形を細かく識別することが困難であるが、図 4-28-b では NIR を湖水が吸収したため、芦ノ湖の水域と陸域の境界を明確に見分けることができ、また中央火口丘や芦ノ湖西岸に存在するカルデラ壁も明瞭に識別することができる。カルデラ壁西縁よりさらにその西側では古期外輪山噴出物が堆積している(小林ほか, 1997)が、これが侵食され、西南西-東北東方向にガリーが発達していることが明瞭に認識できる。これらの画像は 10:10 に撮影されているために太陽直射の陰影が南東から北西に向けて延伸し、これによって地形の凹凸が分かりやすく、火山地形学習に

適している。

この図 4-28-a, b を立体視し、東から西方向を俯瞰した NIR 3D 画像が図 4-29-a, b である。カルデラ内が明瞭に俯瞰できる。SiPSE を用いると俯瞰する方向の設定も容易におこなうことができる。図 4-29-a ではやはり人工建築物や植生によって地形を細かく俯瞰しづらい。しかし図 4-29-b では、図 4-28 同様に芦ノ湖の水域と陸域の境界を明確に見分けることができ、その周囲のカルデラ壁といったカルデラ地形や、侵食によって形成されたガリーも明瞭に概観することができる。この芦ノ湖は、火砕流によって堰き止められた地形に流水が流入し形成された（袴田，1981）。

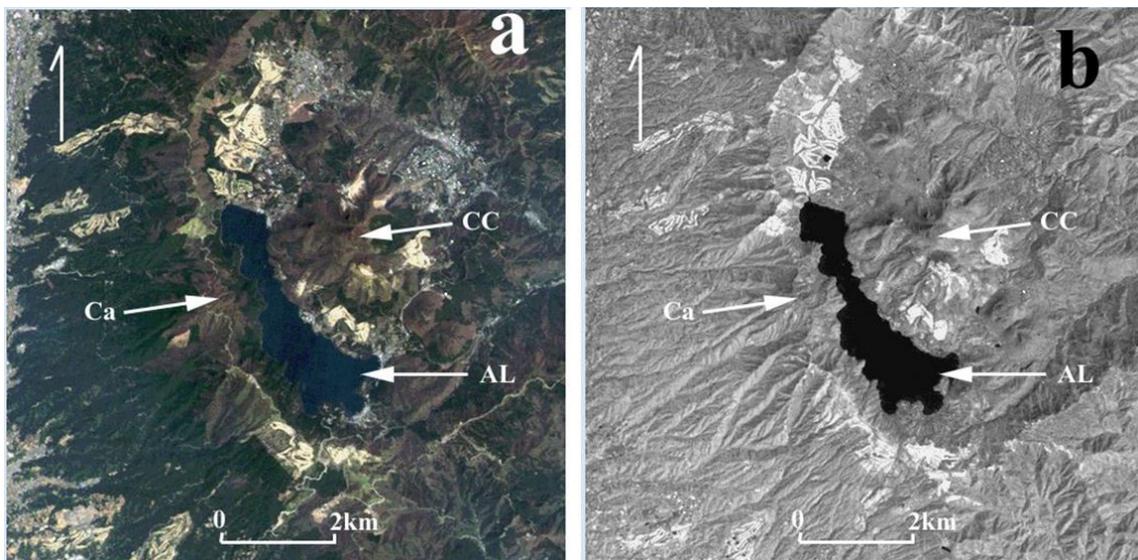


図 4-28 箱根火山と半島の(a)：可視画像，(b)：NIR 画像。AL：芦ノ湖，CC：中央火口丘，Ca：カルデラ壁の一部。

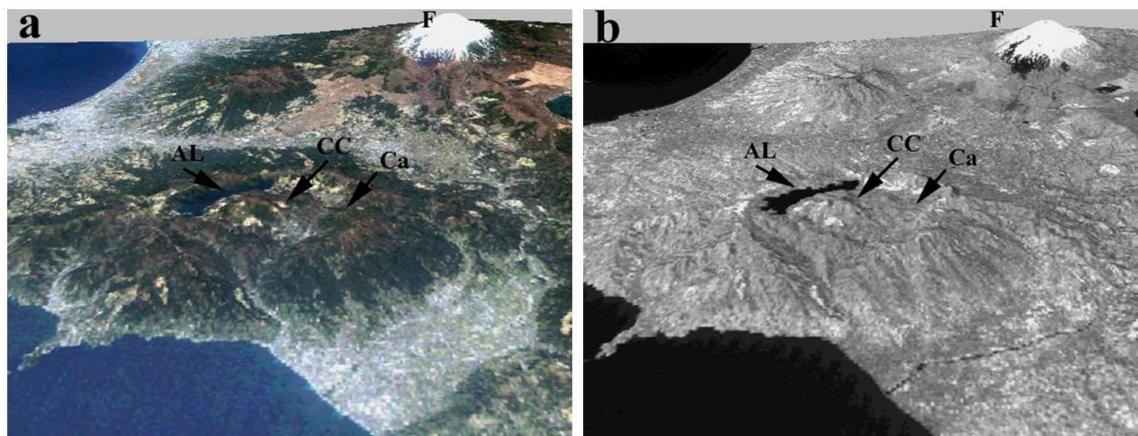


図 4-29 東から西方向へ箱根火山とその周辺を俯瞰した(a)：可視 3D 画像，(b)：NIR 3D 画像。F：富士火山，AL：芦ノ湖，CC：中央火口丘，Ca：カルデラ壁北縁

### 5.2.12. 伊豆大島

伊豆大島は、東京の南南西約 100 km に位置し、伊豆・小笠原弧の火山フロント上に存在する。1986 年の三原山および外輪山山腹の割れ目噴火によって発生した火山災害では全住民の避難に至った。この噴火では、噴出物の多くが火口から東方向に堆積した（遠藤ほか，1987）。図 4-30-a, b で直上から伊豆大島を識別すると、その噴火によって流出した溶岩流および噴出物によって堆積した火砕物が存在する位置では植生が回復していないため、画像が黒色に見えることがわかる。特に図 4-30-b の NIR 画像では、明確にその様子が識別でき、火山の植生の回復を視るときや火山災害からの経年変化を視るには NIR 画像が有効であることがわかる。

伊豆大島火山は活動的な火山であり、玄武岩質岩石や火砕岩によって構成され（一色，1984），なだらかな火山地形を有する。図 4-30-b の NIR 画像において、三原山火山の南部および西部では高所から低所に向けてガリーによる「しわ」を識別することができ、火山地形の侵食の様子を見ることができる。

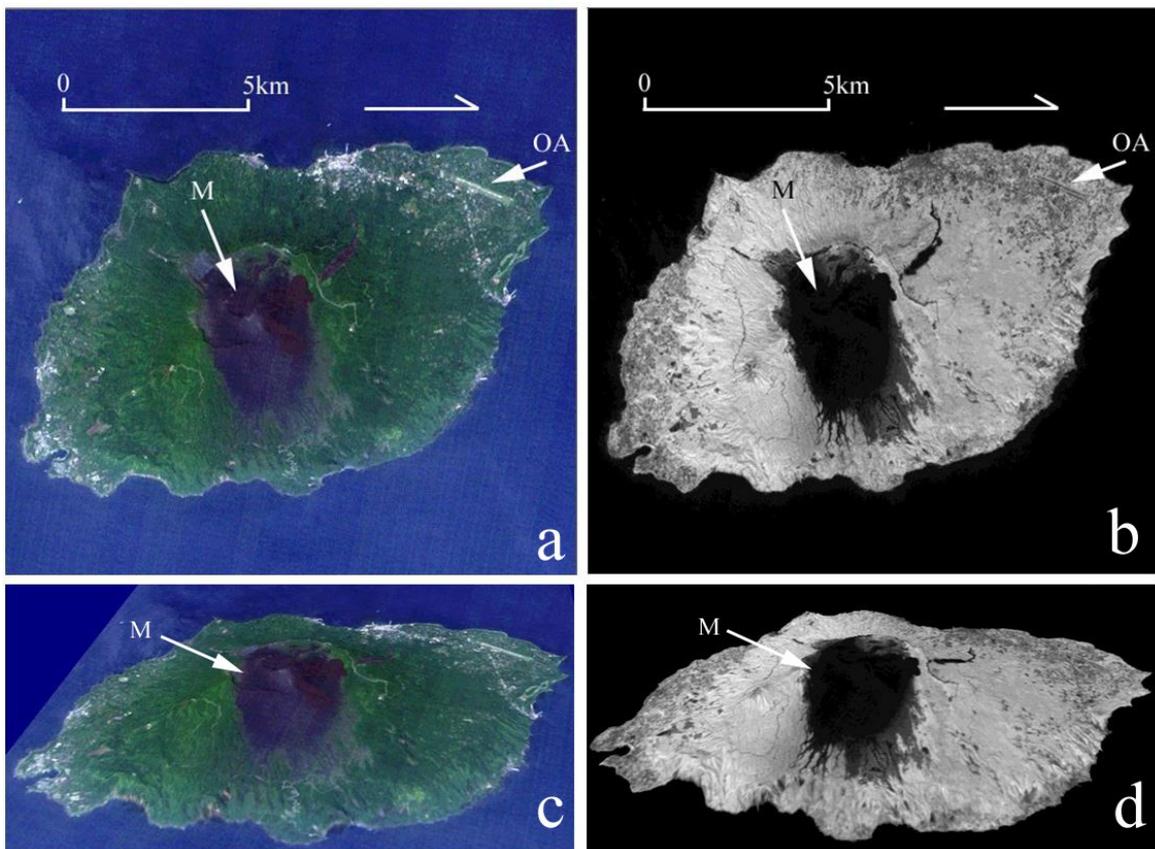


図 4-30 伊豆大島の(a)：可視画像，(b)：NIR 画像，(c)：可視 3D 画像，(d)：NIR 3D 画像。M：三原山火山，OA：大島飛行場

### 4.3. 本章の考察とまとめ

野外観察をすることが少ない小・中・高校の教育環境の現状には、改善すべき問題点が提起されている（宮下，1999；三次，2008）。こうした問題点を補完する意味において、情報機器を活用した地学教材の開発とその利用法の研究は急務である。また優れたソフトウェアやシステムが開発され、そこに新しい可能性が開けても、専門知識を踏まえた適用例の蓄積がなければ、大きく普及することは困難である。こうした例を蓄積していくことも必要である。

衛星画像立体表示によって俯瞰した火山地形に関する研究は、まだ歴史が浅く、活用の方法等も含め、今後大いに研究されていくべき分野である。本章によって考察してきたように、NIR 画像は、水面が NIR を吸収するために水域と陸域の境界線を明確に見分けることができる。また植物のない裸地や都市域、海洋なども NIR の反射が少ないために黒く見え、その性質から植生もはっきり識別することができる。また火山地形は、火砕流堆積物などで形成されることが多く、三次元的な侵食が他の地質よりも著しい場合が多いが、NIR 画像はこうした開析を識別しやすく、この特徴によってユーザーが地形の特徴を捉えやすい利点がある。さらに NIR 画像は、火山地形だけでなく段丘・断層などの地形も教材として明確に表現することができ、教室にしながら郷土の地形野外観察活動を効果的におこなうことができるものに発展する可能性を持っている。こうしたことから今後は、NIR 画像・NIR 3D 画像による教育成果を教育関係者などの間で共有・データベース化し、教育実践例を積み上げていくことが大きな課題である。また火山地形教育や防災教育だけでなく、自然地理学や生態学、そしてそれらの教育的分野においても、その活用法の研究が必要である。

高校教育の中で地学教育が行われることが少なくなって久しいが、こうした学校教育の中での防災教育は、小・中学校で広く行われることが望ましい。小・中学生に対する防災教育の効果の研究や具体的方法の確立に関する研究が喫緊の課題である。また九州には火山をテーマにした島原半島ジオパークや霧島ジオパークがあり、今後もいくつかのジオパーク構想が存在する。こうした地質遺産やさまざまな自然景観が市民に与える恩恵は、非常に大きいものがある。こうした観点において火山地形に関する市民のリテラシーの向上のためにこの教材をどのように活用していくかは重要なテーマである。

本章において明らかになったことを次の(1)～(9)にまとめる。

- (1) NIR 画像は、水面が NIR を吸収するために、水域と陸域の境界線を明確に見分けることができる。
- (2) 植物のない裸地や都市域・海洋なども NIR の反射が少ないために黒く見え、その性質から植生域も識別することが可能である。
- (3) 地形の濃淡によって植生の回復を識別できるために、複数の噴火災害のある火山の場合、この特長を用いて火山災害の歴史を知ることができる場合がある。
- (4) 火山地形は、火砕流堆積物などで形成されることが多く、三次元的な侵食が、他の地質よりも著しい場合が多い。NIR 画像はこうした開析を識別しやすい特長があり、これによりユーザーは下方侵食などの火山地形の特徴を捉えやすい利点がある。
- (5) NIR 3D 画像は、火山地形だけでなく段丘・断層などの地形も教材として明確に表現することができ、教室にしながら郷土の地形野外観察活動を効果的に補完することができる可能性を持っている。
- (6) NIR 画像・NIR 3D 画像はカルデラ地形を俯瞰する場合に効果的にその特徴を表現する。また中央火口丘やその風化の程度も明瞭に識別することができる。
- (7) NIR 画像・NIR 3D 画像による教育成果を教育関係者などの間で共有・データベース化し、教育実践例を積み上げていくことが大きな課題である。また火山地形教育や防災教育だけでなく、自然地理学や生態学、そしてそれらの教育的分野においても、その活用法の研究が必要である。
- (8) 高校教育の中で地学教育が行われることが少なくなって久しいが、こうした学校教育の中での防災教育は、小・中学校で広く行われることが望ましい。小・中学生に対する防災教育の効果の研究や具体的方法の確立に関する研究が喫緊の課題である。
- (9) 九州には火山をテーマにした島原半島ジオパークや霧島ジオパークがあり、今後もいくつかのジオパーク構想が存在する。こうした地質遺産やさまざまな自然景観が市民に与える恩恵は、非常に大きいものがある。こうした観点において火山地形に関する市民のリテラシーの向上のために、この教材をどのように活用していくかを検討する必要がある。

## 第5章 火山防災教育の実践

### 5.1. 火山防災に関する高校生の実態

#### 5.1.1. 火山ガス防災の現状とその教育に必要な条件

火山ガスに関する研究論文の中には「くぼ地や低地、谷筋などガスがたまったり集まりやすい地形や風が弱くガスがよどみやすい気象条件のとき、ガス中毒事故が発生しやすいので特に注意が必要である」と説明する場合が散見できる（例えば、小坂ほか、1998）。同じような警告として、1995年10月11日に257年ぶりに活動を開始し、SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象が観測されているくじゅう硫黄山（加藤ほか、1995）への登山口には図5-1のような注意書きがされている。先に述べた研究論文やこの硫黄山における注意書きは、SO<sub>2</sub>ガス高濃度事象とH<sub>2</sub>Sガスの高濃度事象を混同しているケースにあたる（飯野ほか、2002）。

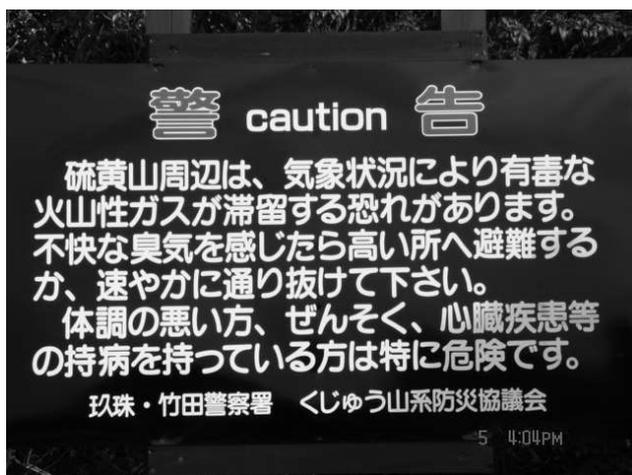


図5-1 阿蘇・くじゅう国立公園 牧の戸登山口にある火山ガス注意書き（撮影；木下紀正氏）

さまざまな自治体が発行している火山防災マップを見ると、H<sub>2</sub>SガスとSO<sub>2</sub>ガスの高濃度事象に関する注意事項が混同されている場合が散見できる。SO<sub>2</sub>ガスの高濃度事象は、第3章で考察したように弱風下での滞留で発生すると考えることは多くの危険性がある。むしろ風速が8m/secを超える強風下でこそ発生している。このことから火山ガス防災教育の前提となる自然科学的条件として特に次の点を述べておきたい。

- (1) SO<sub>2</sub>ガスの高濃度事象とH<sub>2</sub>Sガスの高濃度事象は、はっきりと分けて考えるべきである。高温で放出されるSO<sub>2</sub>ガスの高濃度事象は強風下で発生することが多く、季節や気象条件と密接に関係がある。比較的低温で放出されるH<sub>2</sub>Sガスの高濃度事象は、地

形的条件によって発生することが多く、特にくぼ地や谷底、温泉地などで災害が発生するケースが多い。

- (2) SO<sub>2</sub>ガスの高濃度事象について、阿蘇中岳の近年の例では1986年、1990年、1997年にそれぞれ死亡事故が発生している。また2000年に噴火した三宅島では全島避難という大きな災害となった。これらのことから高濃度で発生するSO<sub>2</sub>ガスについてより一層の注意を払うべきである。

### 5.1.2. 高等学校における火山防災教育

2003年に施行された高等学校学習指導要領（文部省，1999）の中において、火山・地震等の災害に対する自然科学的内容を教授する科目は理科総合B・地学I・地学IIである。この改訂で新設された科目である理科総合B（主として生物・地学分野）は、各高等学校の裁量で理科総合A（主として物理・化学分野）とどちらか一方もしくは両方を採択することができるように設定された。この理科総合Bの中に「(4)人間の生活と地球環境の変化」という単元があり、そこでの実験・観察の例として「火山噴火の影響と火山の効用」が挙げられている。この地学I・地学IIでは工学部や医学部等の理系大学への進学を希望する場合に、受験科目としてこれを選択できないことが多い。このことが履修者の増えない大きな原因である（坂本，2010）。また地学I・地学IIを担当することができる教師の採用も少なく、教科書採択数から推定すると履修者数が選択理科の中で約3%ともいわれている（岡本，2003；田村，2008）。文部省（1999）による地学Iでは、『「(イ)火山と地震」については、マグマの生成・分化と火山活動，地震の大きさと断層運動，地震および火山の分布などをプレートの運動と関連付けて扱う。火山及びプレート運動のエネルギー源については，地球内部の温度分布を理解させていく中でマントル内での熱対流を扱うが深入りしない。その際，放射性元素などの熱源について簡単に触れる。』となっており，特に具体的な火山活動や火山噴煙活動等に関する防災については触れられていない。また課題研究の内容に「イ 自然環境についての調査」があり，そこで「地域の自然災害の歴史を調べる」という課題例が与えられているが，これに関しても火山活動・火山噴煙活動等に対する具体的な学習記述は見当たらない。しかしこの学習指導要領改定の基本方針には「探求的な学習をより一層重視し，自然を探究する能力や態度を育成する。」「生命現象や地球環境にかかわる自然の事象を探究する学習をおこない，自然を総合的に見る見方や自然を探究する能力と体力を養う。」とあり（文部省，1999），その趣旨から考えると，高校生の生活に密着した火山防災活動に対する

基本的な知識・能力・態度を育成することは大切なことであろう。しかし巨大災害になりうる可能性を有する火山災害に対する国の教育指針として、もっと具体的な火山防災・減災に関する教育内容があってもよいと思われる。

文科省による検定を受けたのち出版されている教科書（数研出版株式会社，2004）を見ると，火山災害に関する小単元が設けられており，その中の本文中に「火山活動にともなう噴石・溶岩流出・降灰・火砕流（ガスや軽石や火山灰が高温のまま高速で斜面を流れ下る現象）・火山泥流・有毒ガスの放出などによって，しばしば人的災害や物的災害が起こる。」と記述されている。また具体的な事例として，1971年草津白根山の火山ガスの有毒成分によって死者が6名出たことが表の中に記載されている。

本章では，こうした火山活動・火山噴煙活動及び火山防災マップに記載されている火山防災用語に関する高校生（以下，学習者）の理解度を調査し，そこから火山防災に関する学習者の現状を明らかにする。そしてさらにそこから浮き彫りになる問題点を克服するため，火山防災に関する実践授業をおこない，火山防災・減災を効果的なものにする方法論の考察をおこなう（坂本ほか，2006）。

高等学校学習指導要領解説理科編（文部科学省，2009）では，地学分野の性格や目標，程度等が変更され，それにあわせて科目名も変更となった。新設された科目「科学と人間生活」では自然災害について「自然と人間生活とのかかわり方の視点から，地域において将来起こる可能性のある自然災害に対する防災についても触れる。関連する観察，実験としては，例えば，地域に発生した過去の自然災害の証拠調べ，各種の情報に基づいた地域のハザードマップづくりなどが考えられる。これらの指導に当たっては，自然景観や自然災害を大地の動的な変化と関連付けてとらえさせ，それらについての科学的な見方や考え方を育成するとともに，興味・関心を高めることが大切である。また，野外観察を行う際には，安全に十分配慮し，計画的に実施する。」と述べられており，自然災害に対する防災教育に対してこれまでよりも一歩踏み込んだ内容となった。同様に新設された科目である「地学基礎」でも地域のハザードマップを活用した教育をするよう指導している。「物理」の中でも剛体のつり合いに関する単元の中に防災に通じる視点を取り込まれており，高等学校理科教育全体が防災教育を意識した内容になっている傾向を見てとれる。

### 5.1.3. 火山防災用語に関するアンケートとその結果

本章の研究を始めるにあたり，現在の学習者が火山防災に対する知識をどの程度もって

いるかをアンケート（質問紙法）によって調査した。小山・坂本（2003）によって市町村防災担当職員や静岡大学生，一般市民等 304 人に対しておこなった富士山火山の火山防災アンケートの結果では，回答者の 7～9 割が富士山噴火の対策や避難について家族や友人と話し合った経験をまったく持っていないか，あまり持っていないことがわかっており，また地震と火山噴火の原因を混同してる回答者が 7～8 割存在していることが明らかになっている。こうした火山噴火に対する学習者の意識調査は，火山災害に直面した際の行政の防災担当者や研究者などの火山防災の担い手側と，学習者などの火山災害の受け手側の間に介在する問題点を明らかにするために必要なものである。そしてこの隔たりを埋める担い手と受け手の間に介在すべきつなぎ手の在り方と位置づけを明らかにするために，今回のアンケートは実施した。

調査日は 2006 年 8 月 23 日，対象とした学習者は鹿児島玉龍高等学校(普通科)理系・文系クラスの 2・3 年生 287 人(男 118 人，女 169 人)である。

質問 1 は，「火山防災マップを知っているか」という問いである。この問いに対する結果を図 5-2 に示す。

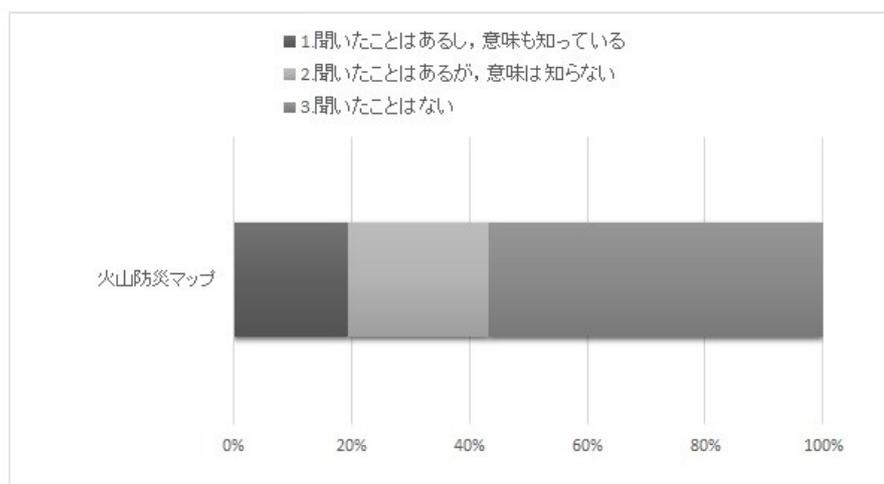


図 5-2 マップ用語に関するアンケート結果

「聞いたことはあるし，意味も知っている」と答えた学習者は 19.5%（56 人）であったのに対し，「聞いたことがない」と答えた学習者は 56.8%（163 人）であった。火山防災の担い手側である防災担当者や研究者が，地域住民に対して緊急時に示す避難行動マニュアルを火山災害に被災する受け手側が「聞いたことはない」「聞いたことはあるが，意味は知らない」の両方の回答，つまり「知らない」を意味する回答が 76.3%という結果であった。この

回答結果は大きな問題を提起する。最新の知見を活かした火山防災マップをいかに精巧に作成しても、災害時にそれを活用する地域住民が少なければ、その防災効果は低いものとなる。

次に質問2は表5-1にあるように、桜島火山防災マップに書かれている火山防災用語についてどのような知識を持っているかを質問した。それに対する回答が図5-3～図5-5である。

表 5-1 火山防災アンケートの質問2

| 次の言葉の意味がわかりますか。 |  |                     |                  |
|-----------------|--|---------------------|------------------|
| (1)             | 噴石   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (2)             | 火砕流  | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (3)             | 熱風   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (4)             | 溶岩流  | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (5)             | 噴出岩塊   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (6)             | 噴気   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (7)             | 降灰   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (8)             | 土石流  | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (9)             | 地震   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (10)            | 岩なだれ   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (11)            | 津波   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (12)            | 火山ガス   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (13)            | 気象台からの情報火山活動レベル 0～5の違い   |                     |                  |
|                 |  | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (14)            | 避難準備, 避難勧告, 避難指示の違い  |                     |                  |
|                 |  | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (15)            | 大規模噴火, 中規模噴火, 小規模噴火の違い   |                     |                  |
|                 |  | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (16)            | 熱雲・サージ   | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (17)            | 地鳴り  | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (18)            | 草木の立ち枯れ  | ①わかる                | ②なんとなくわかる ③わからない |
| (19)            | あなたは「臨時火山情報」という言葉を知っていますか。次の中からひとつだけお答えください。                               |                     |                  |
|                 |  | ①聞いたこともあるし、意味も知っている |                  |
|                 |  | ②聞いたことはあるが、意味は知らない  |                  |
|                 |  | ③聞いたことはない           |                  |
| (20)            | あなたは「緊急火山情報」という言葉を知っていますか。次の中からひとつだけお答えください。                               |                     |                  |
|                 |  | ①聞いたこともあるし、意味も知っている |                  |
|                 |  | ②聞いたことはあるが、意味は知らない  |                  |
|                 |  | ③聞いたことはない           |                  |
| (21)            | この「臨時火山情報」と「緊急火山情報」のうち、危険がより迫ったときに発表されるのはどちらだと思いますか。あなた自身の印象でいずれかをお答えください。 |                     |                  |
|                 |  | ① 臨時火山情報            |                  |
|                 |  | ② 緊急火山情報            |                  |

この質問2に対する回答（図 5-3）では、ほとんどの学習者が「(7) 降灰」（理解できる 86%）, 「(8) 土石流」（同 75%）, 「(9) 地震」（同 95%）, 「(11) 津波」（同 91%）といった火山防災用語を知っていたが、「(1) 噴石」（理解できる 35%）, 「(2) 火砕流」（同 32%）, 「(5) 噴出岩塊」（同 17%）, 「(6) 噴気」（同 19%）, 「(16) サージ」（同 2%）, 「(17) 地鳴り」（同 18%）, 「(18) 草木の立ち枯れ」（13%）といった火山防災用語に対しては知識・理解が不足していることがわかった。この知識・理解が不足している用語は、火山災害を早期発見するために必要な用語であったり、深刻な被害をもたらす可能性がある火山活動現象を表現した用語である。これらは活火山の近くに住む地域住民にとって正確な知識・理解が必要である。また気象庁から発表される火山活動情報に関する用語「(13) 気象台からの情報火山活動レベル 0~5」（理解できる 3.5%）, 「(14) 避難準備, 避難勧告, 避難指示の違い」（同 18.5%）, 「大規模噴火, 中規模噴火, 小規模噴火の違い」（同 5.6%）という結果も、ほとんどの学習者は火山防災マップに記載されている火山防災用語を理解できないことを示している。

図 5-4 に「(19) あなたは「臨時火山情報」という言葉を知っていますか」, 「(20) あなたは「緊急火山情報」という言葉を知っていますか」という問いに対する回答結果を示す。これまで気象庁による火山噴火情報は、「緊急火山情報」・「臨時火山情報」・「火山観測情報」の 3 種類が存在したが、2007 年の気象業務法の一部を改正する法律案の成立によって 2007 年 12 月から火山現象の予報および警報が大きく変化した。今回のアンケートはその改正前のものであったため、この臨時及び緊急火山情報に関する用語の知識を問うたが、60%近い学習者はその用語を「聞いたことがない」と回答した。また「聞いたこともあるし、意味も知っている」と回答した学習者は 5%程度であり、このことから気象庁によってこの用語が発令されても、その防災的な効果はほとんど期待できないことがわかる。

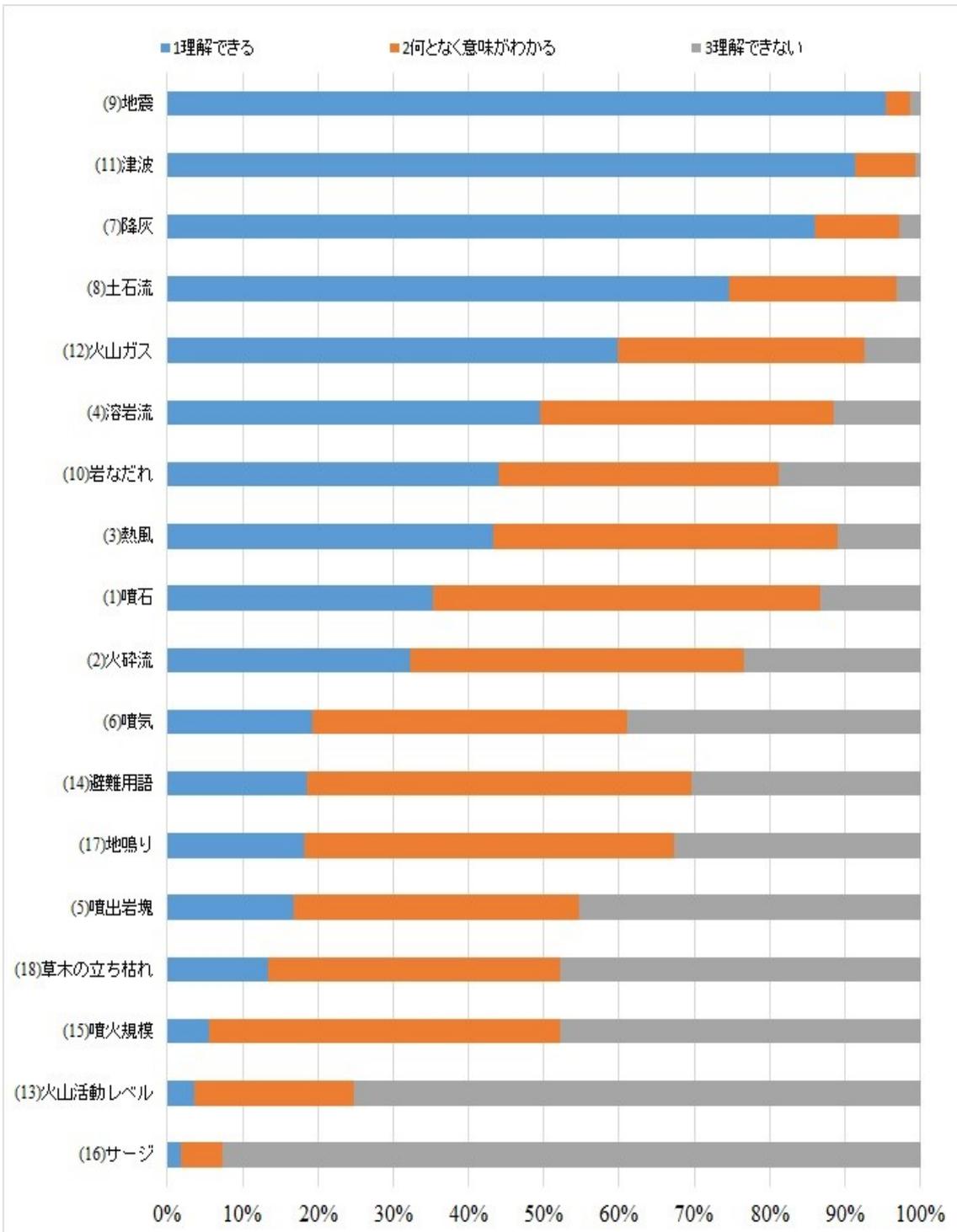


図 5-3 質問 2 のマップ用語に関するアンケート結果。ただし次の項目は以下の説明のとおりである。「噴火規模」：大規模噴火，中規模噴火，小規模噴火の違いがわかるかという問いのことである。「避難用語」：避難準備，避難勧告，避難指示の違いがわかるかという問いのことである。「火山活動レベル」：気象台からの情報火山活動レベル 0～5 の違いがわかるかという問いのことである。

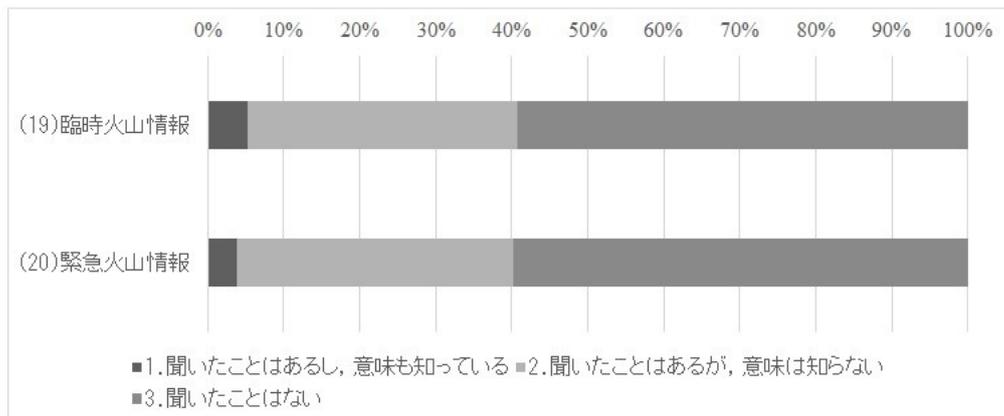


図 5-4 質問 2-(19)・(20)の回答グラフ

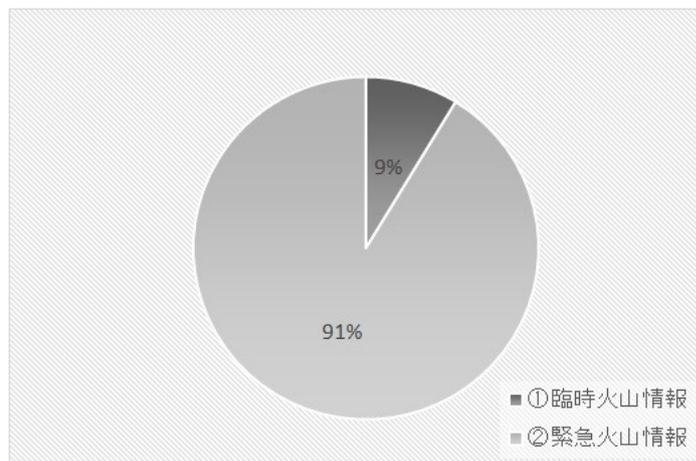


図 5-5 質問 2-(21)の回答グラフ

次に質問 2-(21)で気象庁から発表される用語である「臨時火山情報」・「緊急火山情報」の危険度の相違が認識できるかについて問うたが、これに対する回答を図 5-5 に示す。これらの用語も 2007 年 12 月より気象庁により、「噴火予報」・「噴火警報（火口周辺）又は火口周辺警報」・「噴火警報（居住地域）又は噴火警報」と用語名とその用法が改訂されたが、今回のアンケートは改訂前であったため旧用語について調査してある。質問 2-(19)・(20)からこれらの防災用語について多くの回答者は正確な知識を持っていることがわかる。この結果を他の調査結果とあわせて考察すると、言葉として「臨時」よりも「緊急」の方が語感に切迫感があるためにこの結果になったと推測できる。

以上のアンケートの検討結果は防災教育と関わって次のような点を指摘することができ

る。

桜島火山防災マップをはじめ、行政等が作成した火山災害ハザードマップには火山防災に関する専門的な用語が多く記載されている。それゆえこのマップは、高校生などの受け手側に火山防災用語や避難方法に対する基本的な知識や経験がなければその機能を十分に発揮することはできない。しかし今回のアンケート結果から、現状では行政が災害を防ぐために意図したさまざまな手だてを受け手側は理解することができず、十分な防災効果を得ることはできない可能性があることが明らかになった。つまり火山活動が活発化したり火山災害発生時には、気象庁や噴火予知連、多くの研究者といった防災の担い手側が、火山防災情報や自然科学的知見をメディアや情報通信機器を通して大量に情報を発信しても、その情報の意味する内容を受け手側が正確に理解することができない可能性があることを示している。担い手側から発せられる災害に関する情報が十分にあっても、受け手側にそれを処理する能力がなければ、防災・減災を実現することは困難であるだけでなく、東北地方太平洋沖地震をはじめ、大正噴火・有珠山噴火・雲仙普賢岳噴火時でも見られたように、さまざまなデマが発生する可能性もある（例えば、田川，2011；市口，2011）。

こうした観点から、今後発生する可能性が高い火山災害に備えて、早急に学校教育の中に火山防災教育を取り入れ、学習者の「防災リテラシー」を向上させる教育システムの構築が必要がある。

## 5.2. 桜島火山防災マップの評価とその防災教育

### 5.2.1. 桜島火山活動を取り巻く社会の現状

1982年～2012年における桜島火山の爆発・噴火回数グラフを図5-6に示す（鹿児島地方気象台，2013a；鹿児島地方気象台，2013b）。2001年-2008年にかけては爆発・噴火回数ともに少なかったが、2009年-2012年にかけてその爆発・噴火活動が急増し始めたことがわかる。

2006年当時、桜島火山は、気象庁の活火山評価では全国で13火山指定されているランクAのひとつであった（気象庁，2003）。2006年6月4日、桜島昭和火口からの噴煙活動が58年ぶりに再開した。その後同12日18時35分、福岡管区気象台と鹿児島地方気象台は臨時火山情報第1号で、「桜島の昭和火口の活動が活発化しており、今後、従来の南岳火口で発生していた噴火と同じような噴火が発生する可能性が高くなっています。南岳山

頂火口に加え、昭和火口付近での新たな火口の噴火活動に注意してください。＜火山活動レベルを2から3に引き上げました＞」と発表した（福岡管区気象台・鹿児島地方気象台，2006）。また火山噴火予知連の石原副会長による「噴石が2，3 km先まで飛散する可能性があるほか、火砕流が発生する恐れを含め、今回の活動をあまり軽視するわけにはいかない」というコメントが報道された（西日本新聞，2006）。その後，同14日14:00から鹿児島県は災害対策本部室で県地域防災計画に基づく桜島爆発災害対策連絡会議を開催した。そして同22日の夕方には、桜島昭和火口の直径が約100mの大きさに成長した。

2006年8月18日15時30分、桜島火山の火山活動レベルは3から2に引き下げられたが、その活動が急激に沈静化するとは考えられず、むしろ桜島火山ではその北岸から始良カルデラの中央部を中心とする顕著な地盤の膨張が検出されており、現在では桜島火山が本格的なマグマ蓄積期に入ったと判断されている（井口ほか，2008）。

2009年からは爆発的噴火回数および噴火回数が急増し始め、2009年は噴火回数が755回、うち爆発的噴火回数は548回、2010年の噴火回数1026回、うち爆発的噴火回数は896回、2011年の噴火回数は1355回、うち爆発的噴火回数は996回、2012年の噴火回数は1107回、うち爆発的噴火回数は885回であり、これらのほぼすべてが昭和火口からの噴火及び爆発的噴火活動であった（南岳火口からの噴火回数4回、うち爆発的噴火4回）。また火山ガス高濃度事象も急増し始めている（坂本・木下，2014）。

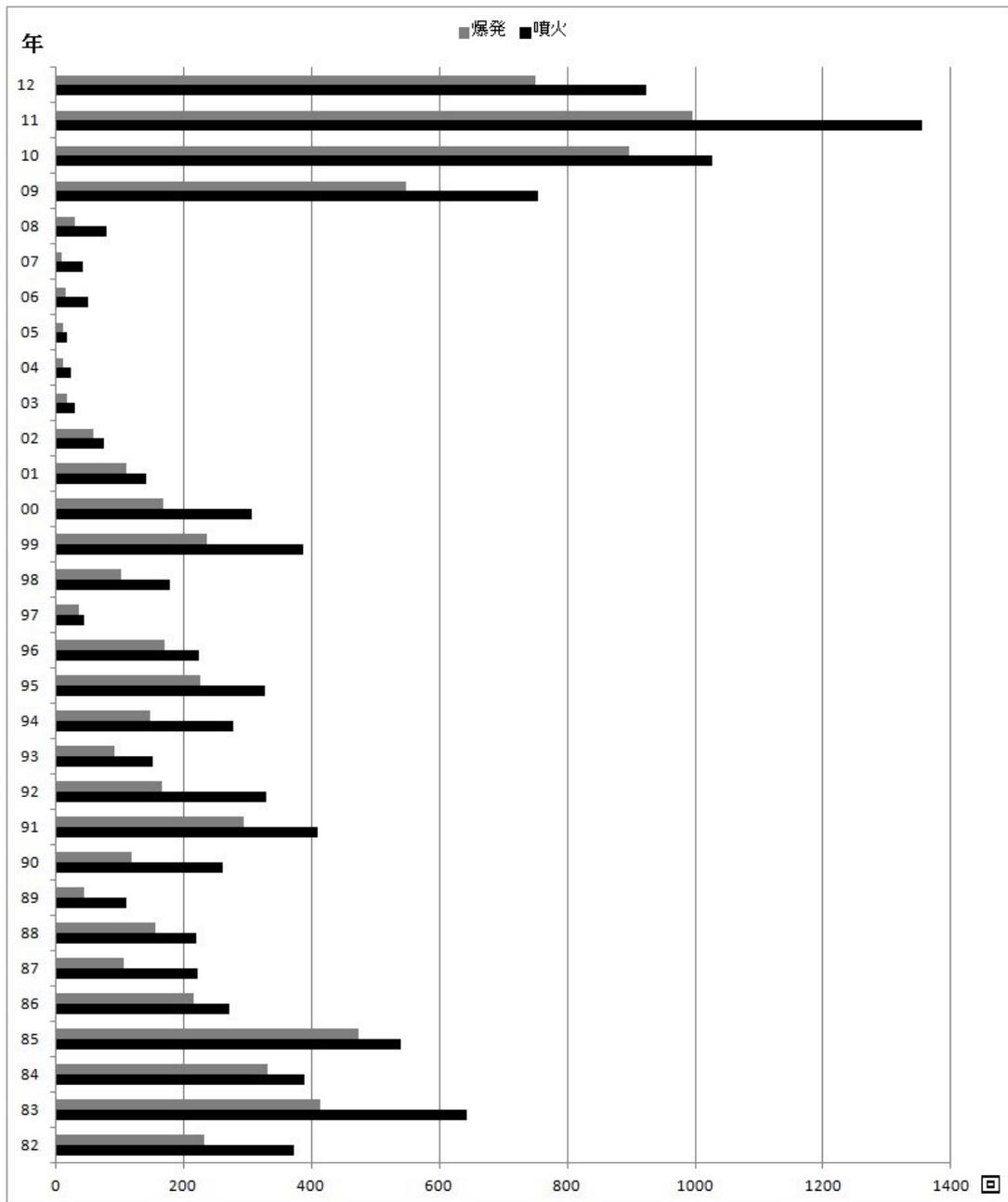


図 5-6 1982 年-2012 年における桜島火山の爆発・噴火回数（鹿児島地方気象台，2013a；鹿児島地方気象台，2013b）

### 5.2.2. 桜島火山防災マップ作成の経緯

1991 年発生した島原雲仙普賢岳の火山噴火災害を発端として，国土庁防災局（1992）が火山噴火災害危険区域予測図作成指針を出すと，鹿児島市はこれを受け，同年垂水市と

桜島町（現鹿児島市）と協力して「桜島火山噴火災害危険区域予測調査検討委員会」を設置し、マップ作成に着手した。同委員会は鹿児島市助役、桜島町助役、垂水市助役、鹿児島県総務部長、消防防災課長、砂防課長といった関係自治体代表者、鹿児島地方気象台長、大隅工事事務所長、鹿児島営林署長等の国出先機関代表者、火山学・砂防工学・社会学・歴史学の学識経験者によって構成され、マップの規模や様式等について検討を重ねた。その結果、このマップは大正噴火級のプリニー式噴火を想定し、それに対応した住民啓発型防災マップと行政資料型防災マップを作成することになった。

日本における火山防災マップ作成の経緯は、1983年の北海道駒ヶ岳火山噴火地域防災計画図から始まる（国土交通省、2004）。日本は火山災害に対して脆弱な国土条件にある。それから国民の生命・身体・財産等を災害から守るため、国土庁防災局が昭和63年から始めた「防災マップ作成モデル事業」の一環として、火山災害が危惧される地域の自治体が行組みを始めた。その主たる目的は国土と災害に対する正しい情報の周知にある。この火山防災事業に対して国土庁防災局は、火山災害に注意が必要な地域に居住する住民等に対して、噴火口・水蒸気爆発・火山ガス等の発生・溶岩流・火砕流・土石流・泥流等の移流・噴出岩塊・火山灰・軽石の降下等について把握しておくように提言している。また過去の災害実績や噴出物分布等から影響範囲をあらかじめ地図上で把握し、火山災害から安全を確保するための火山噴火時避難所（退避舎・退避壕）、海岸部では船舶で避難するための避難港、火山情報や避難命令等を広報する非常警報施設（防災行政無線拡声子局）等をあらかじめ地図上で把握しておくべきであるとも述べている（国土庁防災局、1992）。

1994年版（平成6年版）の住民啓発型桜島火山防災マップ（鹿児島市・垂水市・桜島町、1994）はB2サイズの片面印刷（図5-7）である。このサイズは自宅・職場等の壁に貼り付けるには適切である。印刷文字のサイズも適切であり、老人から中学生程度までは容易に読むことができる。記載内容は、大規模噴火時の噴石到達予想範囲、火砕流・熱風の移流予測図、1986年11月の噴火時を参考とした中規模噴火時の噴石到達予想範囲、そして新しい火口のできる可能性範囲、立入禁止区域、避難港、避難船名がマップの中央に大きく記載されている。マップ中央上には過去の噴火時に発生した溶岩流の移流図、マップ下方には気象台からの火山情報解説や鹿児島市からの情報解説、【避難のための情報と取るべき行動】【普段から準備】についての解説、全島避難等の事態になったときの避難場所、主な前兆現象に関する解説とそれを発見したときの連絡先等が記載されている。この

マップは1994年に鹿児島市・垂水市・桜島町によって発行され（図5-7），2002年に鹿児島市によって修正，更に2006年に再修正をおこなった。この再修正版マップを2006年内に桜島島内の全世帯に配布することが，2006年1月16日の桜島火山防災検討委員会です承されて実行された。その後すぐに桜島昭和火口の噴火活動が再開し，火砕流・火山泥流・土石流等の発生が懸念されたため，図5-8に示す「桜島の立入禁止区域の拡大について」版を同6月14日に1500枚を作成・印刷した（鹿児島市安心安全課，2006）。そしてこのマップを桜島住民へ配布した。また桜島フェリー，桜島島内の公共施設等にも掲示されており，マップが観光客等の目につくような努力がなされている。

2010年にはさらに改正され，「桜島火山ハザードマップ」と名称を改め，紙面には避難・警戒区域の詳細地図，桜島フェリーの着岸港，前兆現象，避難勧告等の情報伝達，避難手順，噴火警戒レベルと防災対応，過去の4大噴火の概要と近年の主な噴火活動，桜島の火山災害現象などをコンパクトに掲載している（図5-9）（鹿児島市危機管理課，2010）。これと同様の内容が掲載されている英語版も同時に発行されており，観光地化している桜島の現状に沿った作成方針になっている。

### 5.2.3. 桜島火山防災マップの評価と問題点

桜島火山防災マップをどのように評価するかについて，例えば石原（2005），石原（2006）の先行研究がある。このマップは前述したようにプリニー式の大正噴火を想定し，その有事の際に桜島住民がどのように行動すればよいかに力点を置いて作成された。しかし桜島の噴火史や活動の現状とこのマップの記載事項を比較すると，2006・2010年版マップ（図5-8，図5-9）における問題点は次の(1)～(6)が考えられる。

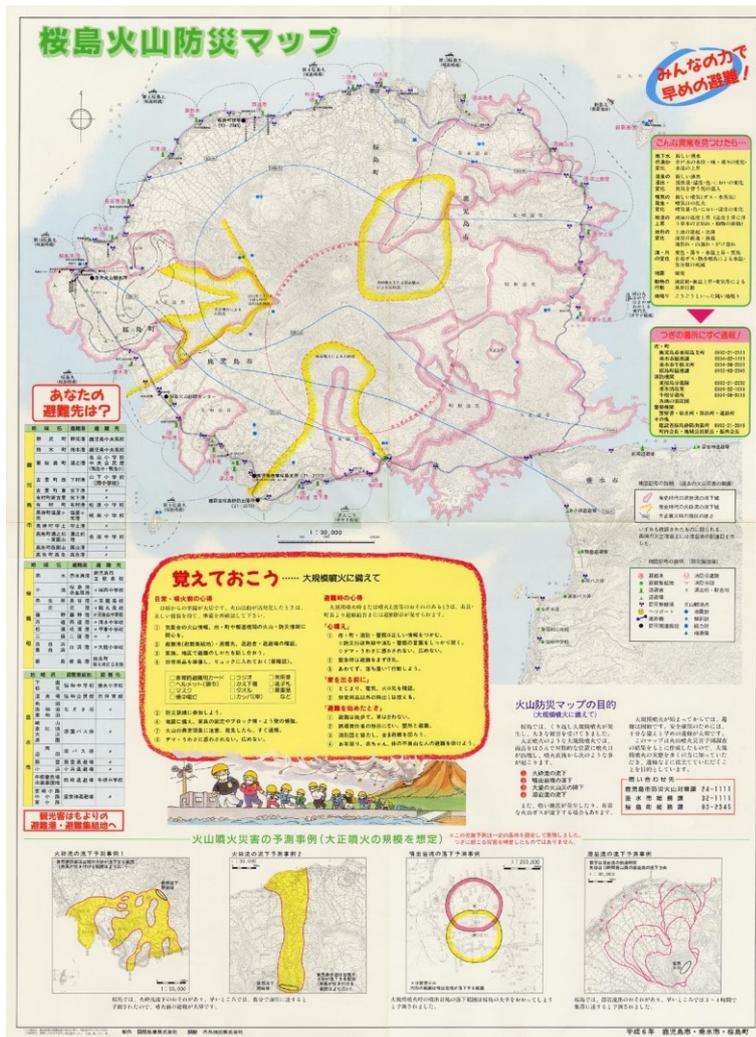


図 5-7 1994 年版 桜島火山防災マップ (鹿児島市・垂水市・桜島町, 1994)



図 5-8 2006 年版 桜島火山防災マップ (鹿児島市安心安全課, 2006)

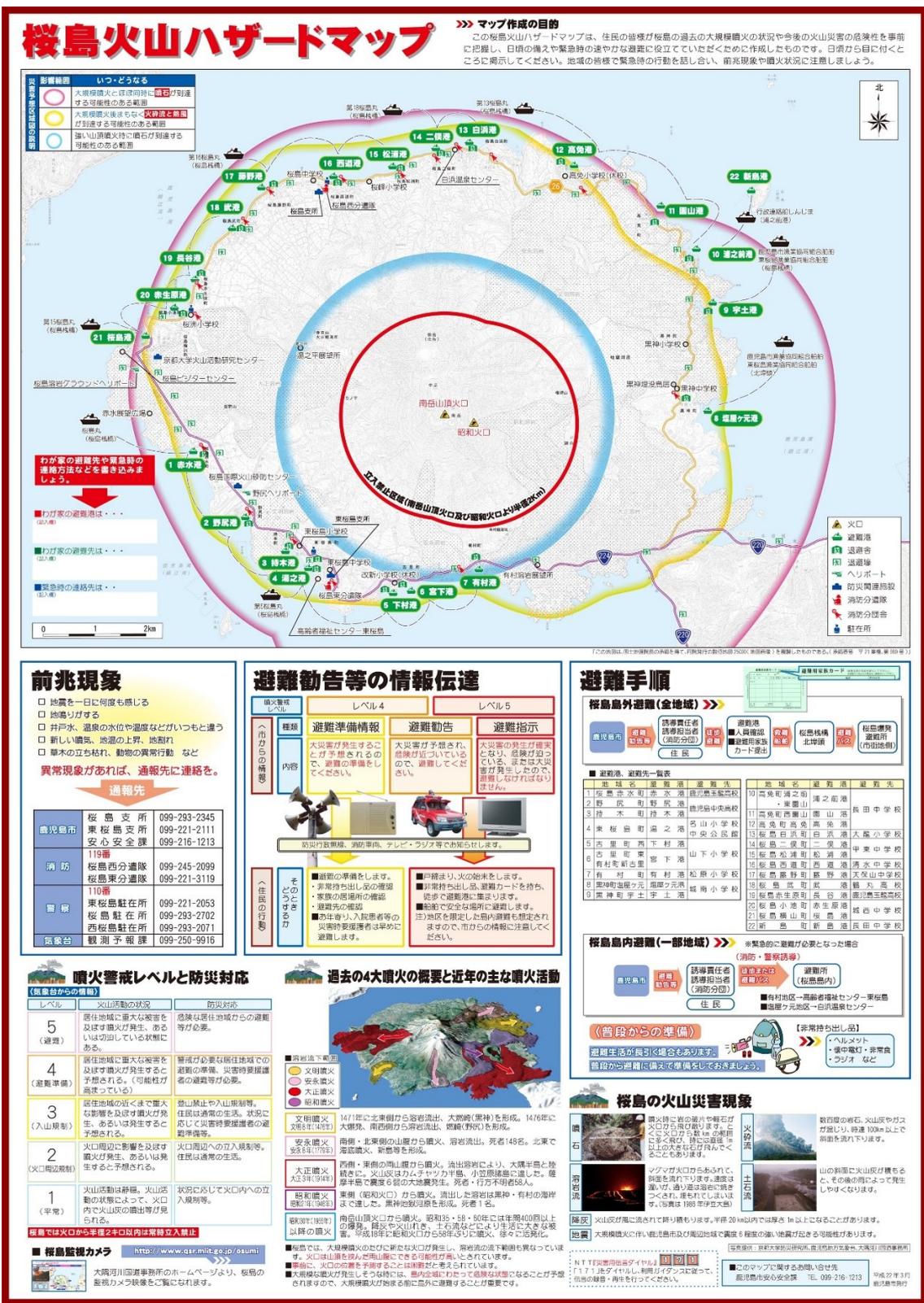


図 5-9 2010 年版 桜島火山ハザードマップ(日本語版). (鹿児島市危機管理課, 2010)

## (1) 火山ガス高濃度事象について

火山ガスの生成温度が高温である場合や火山ガスが地下深い高圧の環境で生成された場合は SO<sub>2</sub> ガス量が増加し、ガスの生成温度が低温や地下浅く、低圧の環境下で生成された場合は H<sub>2</sub>S ガス量が増加する。しかしこの化学平衡に対する防災的な対策は普及していない。現在のところ主たる火山の例をあげれば桜島・阿蘇・三宅島雄山等では SO<sub>2</sub> ガスが、箱根湯ノ花沢・草津白根山等では H<sub>2</sub>S ガスが発生するが、こうした火山ガスの性質の相違によって防災対策も異ならなければならない。火山ガスは環境基準を超える高濃度事象を発生させることがあるが、桜島火山におけるこの現象はこれまで得られた知見により気象と密接に関係することがわかっている（例えば木下・飯野，1998；坂本・木下，2005）。阿蘇や三宅島雄山の例からもこの災害を火山災害としてマップに記載する必要性がある。

三宅島雄山研究において得られた火山ガス高濃度事象に関する知見に基づいて設定された「三宅村火山ガスに対する安全確保に関する条例施行規則」（三宅村，2005）では、表 5-2 の火山ガス濃度になると即時警報が発令され、地域住民は常時携帯しているガスマスク等をすぐに着用するように義務づけられている。こうした知見を桜島火山でも十分に活かす準備をおこなうべきである。

表 5-2 三宅村火山ガスに対する安全確保に関する条例による火山ガスの注意報・警報範囲（火山ガス濃度は 5 分間値）

| レベル   | 火山ガス濃度(ppb) | ガスの注意報・警報 |
|-------|-------------|-----------|
| レベル 1 | 200-600     | 高感受性者注意報  |
| レベル 2 | 600-2000    | 高感受性者警報   |
| レベル 3 | 2000-5000   | 一般注意報     |
| レベル 4 | 5000以上      | 一般警報      |

## (2) 火山防災マップの配付区域について

火山防災マップの配布区域は、鹿児島湾沿岸に住む約 70 万人の住民を対象とすべきである。過去の噴火の例を見ても、火山活動に伴う地震・津波災害発生の可能性が高い。大正噴火では地震とそれを原因とした家屋崩壊の被災が最も多かった。また 65 名の死者・行方不明者のうち 40 名が島外である鹿児島市内と大隅半島における被災であった（石原，2005）。こうした事実をふまえ、広域性の高い桜島火山防災マップを被災可能性が存在する鹿児島湾沿岸に住む住民に普及させるべきである。現在、桜島広

域火山防災マップ（国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所，2007）が存在している。この配付・普及を国・県が主体となって鹿児島湾全域に居住する地域住民に広げるべきである。

### (3) 津波について

大正噴火では津波が発生せず，このマップではその記載が小さく扱われているが，桜島には1780年8月-1781年3月までに海底噴火等で津波発生している。そのうち1781年3月18日の高免沖での海底噴火では波高数十メートルの津波が発生し，死者・行方不明者約20人という被災の歴史がある（鹿児島県危機管理局危機管理防災課桜島大正噴火100周年事業実行委員会，2014）。1792年5月21日に発生した島原の眉山崩壊によって発生した津波災害では，その犠牲者が11,000人とも言われ（宇井,1997），火山活動によって発生する津波災害は一度に多くの被害者を出す可能性がある。火山噴火に伴う津波の可能性は低いものではなく，鹿児島湾上にある桜島火山では必ずこの津波災害の想定をしておかなくてはならない。

### (4) 避難方法について

桜島火山防災マップでは火山噴火時には各漁港から桜島フェリーを使用して避難住民を搬送する予定になっているが，大正噴火では桜島周辺の海上は軽石であふれ，汽船や救助船，軍艦等が桜島に接岸できなかった例がある（図5-10）。



図 5-10 大正噴火時における海上に浮かぶ軽石の様子（鹿児島県立博物館所蔵）

単にフェリーだけの単純な避難体系ではなく、多様な避難方法を準備しておかなければならない。第36回（2006年）や第37回（2007年）桜島総合防災訓練では、ヘリコプター等で孤立した住民避難訓練を実施している。これは豪雪によって取り残された住民を救助した豪雪地方の教訓から得られた訓練法であるが、こうした避難方法の研究は今後更に強化されるべきである。そして多様な避難方法についてマップに記載し、住民に対して積極的な教育普及活動を実施することが必要である。2006年7月18日には鹿児島県警が有村地区と黒神地区の住民を対象とし、ヘリコプターや警備艇を使用した避難訓練を計画し実行したが、こうした避難訓練を全島でおこない、避難方法を体験させることは、火山災害を減災するために非常に有効な手段である。

#### (5) 災害弱者について

住民の避難時には災害弱者（視覚・聴覚障害者、乳幼児、高齢者、傷病者、自力避難が困難な人、外国人、旅行者等）が最も犠牲になりやすい。2006年7月18日の避難訓練時には高齢者や要介護者と行政側の連携がうまくいかず、多くの点が問題であると報道された（南日本新聞、2006）。情報機器に対してスキルを持たない被災者や、たとえスキルを有するとしても災害時には情報機器の使用もできなくなる状況も考えられ、災害時には孤立する可能性もあるため、地域に根ざした詳細な火山防災マップを作成し、地域ごとに具体的な救助ネットワークづくりを進めるべきである。

#### (6) 火山防災教育について

地域の防災防災力の向上を図るため、全国的に火山防災マップ等の作成（内閣府（防災担当）ほか、2013）が普及しているが、これまで述べてきたように、ここに記載されている火山防災に関する内容・用語を学習者が正確に把握・理解することは困難である。そこでは流言・デマが発生する可能性も生じる（田川、2011）。火山防災マップを作成し、地域住民に配付するだけでなく学校教育や説明会等を通して児童・生徒・地域住民に対して積極的な防災教育をおこない、地域の「防災リテラシー」向上を目指す努力をすべきである。

### 5.3. 桜島火山に対する防災実践教育

#### 5.3.1. 防災授業のデザイン

人工衛星画像や火山防災マップを用いた火山防災教育、また桜島火山から放出される

SO<sub>2</sub> ガスの高濃度事象を活用した防災学習は、2006 年から 2010 年の 5 カ年にかけて、合計 194 人の鹿児島市立鹿児島玉龍高校（普通科）2 年生の地学 I 選択者を対象に表 5-3 の授業デザインに従って実施した。使用した教材は毎年更新しできるだけ最新のものにしたが、本章での事例は 2010 年に実施したものについて述べる。

表 5-3 2010 年 10 月に実施した実践授業のデザイン

| 授業時間                         | 学習テーマ  | 学習目標・留意点   | 評価項目  |
|------------------------------|--|--|---|
| ① 1 時間目<br>(50 分×2 単位<br>時間) | ・人工衛星画像と火山防災マップを活用した実践授業   | ・桜島火山における災害理解と防災マップの見方・活用法を理解する  | ・火山防災マップの理解度<br>・火山地形の理解度<br>・火山防災マップの活用法・理解度   |
| ② 2 時間目<br>(50 分×2 単位<br>時間) | ・季節に特徴的に見られる気圧配置と風向・風速の理解<br>・桜島火山 SO <sub>2</sub> ガスの濃度と天気図の関連の理解 | ・教科書を用いて、天気図と風向・風速に関する復習および季節に特徴的な気圧配置の理解する<br>・季節の気圧配置と桜島から放出される火山ガスの関連について理解する | ・風向・風速の理解度<br>・天気図に関する理解度<br>・季節に特徴的な気圧配置理解度<br>・桜島火山ガスの高濃度事象の理解度<br>・火山ガス高濃度事象の予測のスキル<br>・火山災害の理解度 |

文部省（1999）は、高校理科教育に対してコンピュータや情報通信ネットワークを用いた情報の収集・検索などを積極的に推進する方針を出した。これにより地学教育では情報機器を活用して地域の地形の特徴を児童・生徒に理解させようという機運が高まった。また火山地形学習では、火山地形に関する多様な科学的知見の広がりや情報機器の発達により、この方針は有効な教育手段になるうるのであらうと考えられた（坂本，2007c）。2012 年から導入された学習指導要領（文部科学省，2009）における科目「科学と人間生活」では、学習指導の中で地域の自然景観の変化と自然災害について触れるように述べられている。また「地学基礎」の学習指導の中ではプレートの発散境界や収束境界における火山活動やホットスポット・火成岩について触れること、「地学」の学習指導においては、日本列島の形成史を地形や地質の特徴に基づいてプレートの運動と関連づけて扱うことが述べられている。こうした科目の中では、地形学習は重要な学習単元として扱われている。また中学校の理科教育地学分野では、「第 2 分野」において、火山の形、活動の様子およびその噴出物を調べ、それらを地下のマグマの性質と関連づけてとらえるとともに、火山岩と深成岩の観察をおこない、それらの組織の違いを成因と関連づけてとらえることとなっており、かつ大地の活動の様子や身近な岩石、地層、地形などの観察を通して、地表に見られ

様々な事物・現象を大地の変化と関連づけて理解させ、大地の変化についての認識を深めるとなっている（文部科学省，2008）。こうした文部科学省が出している方針に加え，2011年において活発化してきた桜島火山や新燃岳火山の噴火活動や，2万人近い死者・行方不明者を出し，巨大災害となった東日本大震災とその津波災害から得た教訓によって，市民の科学的リテラシーの重要性とそれを育成する地学教育の必要性が再認識された（第四紀学会，2011）。それゆえ，災害と密接な関連のある地形に関する具体的教育方法の確立はこうした側面から考えても急務といえる。

1 単位時間が 50 分の火山防災に関する実践授業を 4 単位時間（計 200 分）実施した。表 5-3 に示したように，① 1 時間目（2 単位時間）として，人工衛星画像を用いた火山地形や火山防災マップを理解するために基礎的知識・技能習得を目的とした実践授業を実施した（坂本，2013）。その後，② 2 時間目として，天気図を用いて気圧配置と風向・風速に関する実践授業と SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象と天気に関する実践授業を実施した。

以下，5.3.2.人工衛星画像と火山防災マップを活用した実践授業（実践授業Ⅰ・Ⅱで構成），②季節に特徴的に見られる気圧配置と風向風速の理解と桜島火山 SO<sub>2</sub> ガスの濃度と天気図の関連の理解（実践授業Ⅲ・Ⅳで構成），について報告する。

### 5.3.2. 人工衛星画像と火山防災マップを活用した実践授業

#### 5.3.2.1. 学習の位置づけとねらい

本実践授業は，学習者が高校内に設置されている情報機器を活用して，人工衛星画像と桜島の防災マップ（図 5-9）を用いて現実的な教材の作成と火山防災に関する実践的な授業（Ⅰ・Ⅱ）をおこない，その効果を検証することをねらいとした。

人工衛星画像と火山防災マップを活用した実践授業（2010年6月実施，対象学習者数 194人）は，全2時間（50分×2単位時間，計100分）を用いておこない，実践授業Ⅰ（前半50分）は NIR・NIR3D 画像を用いた火山地形学習，実践授業Ⅱ（後半50分）は火山防災マップを活用した学習をおこなった。それぞれの授業後，学習者にはアンケートを実施し，その効果を調査した。本章における授業は，高校地学Ⅰの次の(1)～(4)の学習が終了している段階で実施した；(1)火山活動，(2)火山の地形，(3)火山の分布，(4)火山岩と火山の噴火様式・規模（数研出版株式会社，2010）。本授業の年間授業計画の中における位置づけと実施時期を表 5-4 に示す。

表 5-4 年間授業計画と実践授業の実施時間（配当時間 1 時間は 50 分）

| 構成                                | 関連単元  | 配当時間数 | 実施時期 |
|-----------------------------------|-------|-------|------|
| 序章 地学Iを学ぶにあたって                    |       | 2     | 4月   |
| <b>第1編 地球の構成</b>                  |       |       |      |
| 第1章 地球の概観                         |       | 7     | 4月   |
| 第2章 地球の内部                         |       | 8     | 5月   |
| <b>第2編 地球の活動と歴史</b>               |       |       |      |
| 第1章 地球の活動                         |       | 11    | 5月   |
|                                   | 火山活動  | 1     | 5月   |
|                                   | 火山の地形 | 1     | 5月   |
|                                   | 火山の分布 | 1     | 5月   |
|                                   | 火山岩   | 3     | 6月   |
| NIR・NIR 3D画像と防災マップを活用した授業         |       | 2     | 6月   |
| 第2章 地層の形成                         |       | 5     | 6月   |
| 第3章 化石と地質時代                       |       | 7     | 7月   |
| <b>第3編 大気・海洋の構成</b>               |       |       |      |
| 第1章 大気・海洋の構造                      | 天気図   | 3     | 9月   |
| 第2章 地球の熱収支と大気・海水の動き               |       | 5     | 10月  |
| 桜島火山SO <sub>2</sub> の濃度と天気図の関連の理解 |       | 2     | 10月  |
| 第3章 大気と海水の運動                      |       | 12    | 11月  |
| 第4章 大気・海洋の相互作用と地球の環境              |       | 4     | 12月  |
| <b>第4編 宇宙の構成</b>                  |       |       |      |
| 第1章 地球と惑星の運動                      |       | 7     | 1月   |
| 第2章 太陽の構造と活動                      |       | 6     | 2月   |
| 第3章 恒星の性質と進化                      |       | 6     | 2月   |
| 第4章 銀河系と宇宙                        |       | 4     | 3月   |
| 計                                 |       | 97    |      |

実践授業 I は、火山地形の学習の主題を「NIR 画像を活用して郷土の火山・カルデラ地形を観察しようー高校地学学習としてー」と設定し実践授業をおこなった。2006 年～2007 年はコンピュータを操作して、実際に SiPSE を用いた画像の取得・印刷とその考察までを研究した（坂本，2007c）。2008 年-2010 年は、SiPSE の操作は簡略化し、コンピュータによる操作およびあらかじめ印刷しておいた画像を観察することによって学習者に火山地形の特徴を理解させ、その成果を意見発表およびアンケートをおこなった。授業を実施するにあたって、(1) コンピュータで SiPSE を使用する際の操作性を知る、(2) 可視画像および NIR 画像を用いて火山地形の特徴を識別し、両者の特徴の違いを明らかにする、(3) NIR 画像及び NIR 3D 画像を用いて火山地形の俯瞰をおこない、それにより火山地形の特

徴を理解する、(4) 火山とその地形に関する用語に習熟させる、という4点を目的とした。

実践授業Ⅱは、学習の主題を「桜島の活動と火山防災マップ（火山防災マップ）の理解と活用」と設定し、防災マップと桜島火山NIR画像および桜島火山地質図を用いて授業をおこなった。この授業を実施するにあたって、(1) 火山活動の原因と人的・物的被害を理解する、(2) 桜島火山におけるこれまでの噴煙・噴火活動の歴史を理解する、(3) 火山災害を減災するために火山防災マップを理解する、(4) 火山防災マップの活用方法に習熟する、という4点を理解させることを目標とした。この目標設定の理由は次の通りである。火山災害では、火砕流・溶岩流・火山ガス・火山性地震・火山性津波・噴石・降灰等が多重に発生する可能性が十分にあり、また一度発生するとその影響が長期間にわたって災害が続く場合が想定される。こうした複合的・長期的火山災害から自らの生命・財産を守り、そして火山の恵みを享受し共存していくためには、郷土の歴史や衛星画像やその立体視画像を用いて火山を深く理解し、緊急時には火山防災マップの作成意図にしたがって行動する技能の習得が重要であることを学習者に理解させることが重要である。そしてさらに高いスキル（リテラシー）を身につけ、火山への深い理解から得られた自己判断力によって災害から身を守る能力が必要である。それゆえこうした能力を身につけることができる学校教育の構築を目指すために(1)～(4)の目標を設定した。

#### 5.3.2.2. 実践授業Ⅰの成果

実践授業Ⅰ（50分×1単位時間）の授業実施内容を表5-5に示す。また実践授業Ⅰを受けた学習者に対して実施したアンケート結果を表5-6に示す。

質問1は、地学的な野外での観察活動の経験の有無を質問したものである。様々な自然現象から共通した法則性を導き出し、理論化する科学的な思考力の養成は、理科教育の大きな目標の一つであり、地学教育の場合、野外観察は欠かすことのできない学習内容である。学校教育の中に多様な野外観察を取り入れる必要性は大きい。今回のアンケート結果では野外観察活動の経験者が11.9%しかおらず、これは科学教育の中で大きな問題点として挙げられるであろう。

質問2は、コンピュータ上でSiPSEを用いてNIR画像、およびNIR3D画像を取得する際の操作性について問うたものである。この質問は2006年、2007年の二年間で92人の学習者に対しておこなったものであるが、そのうち84.8%の学習者は「容易である」「比較的

容易である」と答えた (坂本, 2007c)。授業の中で5分程度を用いて操作の方法については説明したが、ほとんどの学習者は迷うことなく短時間で的確に画像を取得できた。これは火山に関する学習を指導する小・中学校教師にとっても重要なことであり、教育用ソフトウェアは短い時間で簡易な操作性が要求される。さらに SiPSE は航空写真と異なり、学習者自身の興味のある角度・距離で画像を取得することができる特長がある。短時間で学習者自身の興味のある画像を取り出すことができるソフトウェアは、探求的な学習に向いている教材とも言える。

表 5-5 実践授業 I (SiPSE を活用した火山地形授業) の実際

| 火山地形授業の実際 |              |   |                        |   |   |
|-----------|--------------|---|------------------------|---|---|
| 本時の学習目標   |              | NIR 画像を活用して郷土の火山・カルデラ地形を観察しよう<br>—高校地学学習として—  |                        |   |   |
| 時間<br>(分) | 授業の流れ        | 主な発問・行動の概要  | 予想される反<br>応・活動         | 教師の指導・<br>支援  | 留意事項・評<br>価基準   |
| 0         | スタート<br>導入   | ① 火山地形に関する復習  |                        | ・前時の復習<br>①SiPSE の概<br>略説明  | ①~②学習過程<br>を理解できた<br>か。   |
|           | ↓            |   |                        |   |   |
|           | SiPSE の操作    | ② SiPSE の起動<br>③ SiPSE の操作説明<br>④ 阿蘇カルデラの位置の確<br>認と俯瞰<br>⑤ 加久藤・小林カルデラの<br>位置の俯瞰と確認<br>⑥ 始良カルデラの位置の確<br>認と俯瞰<br>⑦ 南西諸島の火山列の俯瞰<br>と確認 | ②~⑦の学習<br>過程を実行す<br>る。 | ③PC の操作が<br>できない生徒<br>を支援する。<br>③-⑤ 教室の<br>共用テレビ画<br>面に大まかな<br>カルデラや火<br>山の位置を提<br>示する。 | ④~⑥の画像は<br>NIR 画像と可<br>視画像の両方<br>を俯瞰するよ<br>うに指示す<br>る。時間がな<br>い場合は省略<br>する。 |
| 25        | ↓            |   |                        |   |   |
|           | 画像の確認・<br>考察 | ⑧カルデラ地形の特徴を考察<br>する。  | ⑧教科書や副<br>教材と見比べ<br>る  | ⑧共用テレビ<br>画面に阿蘇カ<br>ルデラの画像<br>を映し、考察<br>の参考資料と<br>する。                                   | ⑧カルデラ地<br>形の特徴を考<br>察できたか。  |
| 30        | ↓            |   |                        |   |   |
|           | 意見発表         | ⑨理解できたことを画像を用<br>いて発表する。  |                        |   | ⑨意見を述べ<br>ることができ<br>たか  |
| 40        | ↓            |   |                        |   |   |
|           | アンケート        | ⑩アンケートに答える。   |                        | ⑩アンケート<br>用紙を配布す<br>る。<br>⑩アンケート<br>用紙を回収す<br>る。  |   |
| 50        | ↓            |   |                        |   |   |
|           | 終了           |   |                        |   |   |

表 5-6 SiPSE 画像による火山地形授業に対するアンケート結果

|      |                                    |     |       |           |
|------|------------------------------------|-----|-------|-----------|
| 設問 1 | 地学的な野外学習の経験があるか.                   |     |       |           |
|      |                                    | 人数  | 割合    | (n = 194) |
|      | 経験がある                              | 23  | 11.9% |           |
|      | 経験がない                              | 171 | 88.1% |           |
| 設問 2 | SiPSEで画像を取得する際、PCの操作が難しいと思ったか.     |     |       |           |
|      |                                    | 人数  | 割合    | (n = 92)  |
|      | 困難                                 | 2   | 2.2%  |           |
|      | 比較的困難                              | 12  | 13.0% |           |
|      | 比較的容易                              | 40  | 43.5% |           |
|      | 容易である                              | 38  | 41.3% |           |
| 設問 3 | NIR画像と可視画像を見比べて地形的特徴がわかりやすいのはどちらか. |     |       |           |
|      |                                    | 人数  | 割合    | (n = 194) |
|      | 可視画像                               | 68  | 35.1% |           |
|      | 近赤外画像                              | 126 | 64.9% |           |
|      | 無回答                                | 0   | 0.0%  |           |
| 設問 4 | NIR画像を見ることによって九州の火山地形の特徴が理解できたか.   |     |       |           |
|      |                                    | 人数  | 割合    | (n = 194) |
|      | よく理解できた                            | 124 | 63.9% |           |
|      | 比較的よく理解できた                         | 47  | 24.2% |           |
|      | やや理解できなかった                         | 20  | 10.3% |           |
|      | 理解できなかった                           | 3   | 1.5%  |           |

質問 3 は、アンケートで NIR 画像と可視画像はどちらが地形の特徴を捉えやすいかを問うた結果である。可視画像に比べて 64.9%の学習者が NIR 画像のほうが火山地形を認識しやすいと回答した。火山地形を俯瞰する際にカラー写真のような可視画像より NIR 画像が有効であることがわかる。自由記述では「色彩的に植物の影響が少ないので、地形を観察しやすい」という感想が全体の 42.2%であり、NIR 画像の特徴が火山地形学習に適していることがわかる。また図 5-20 の NIR 画像を俯瞰して、「NIR 画像によって桜島の山頂や昭和・大正溶岩の跡などでは植生が回復していないことがわかる」という感想を述べた学習者が 22.7%存在した。野外観察がしづらい環境にある高校地学教育の現状において、こうした自然地形を俯瞰できることは、野外観察がおこないにくい教育環境の現状を補完する意味で有意義である。

南九州の火山地形には大規模なカルデラ地形とその内外に活火山が存在するが、質問 4 で NIR 画像によってその特徴が観察できたかを問うと、88.1%の学習者が「よく理解できた」「比較的よく理解できた」と回答した。自由記述では「衛星画像を 3D 化することによって段丘面などが見えることに驚いた」というものが 10.8%、「この技術は防災的に有効である (11.8%)」、「霧島連山は風化の程度によって形成された時代がわかる (1.5%)」といった回答もあった。また「桜島は扇状地が発達しており、土砂災害が多い地域であることが NIR

画像からわかった」とした学習者もいた。

質問 5 は、南九州の火山地形について理解できたことをアンケート用紙に設置した記入欄に自由に回答するものだが、「南九州のカルデラ地形の周辺には必ず霧島連山・桜島・開聞岳といった活火山が存在している」という回答が全体の 72.7%を占め、南九州のカルデラ地形の特徴がとらえやすかったことがわかる。また「加久藤・始良・阿多カルデラは北北東-南南西方向に直線的に位置していることがわかった」と記述した学習者が 12.9%存在した。

### 5.3.2.3. 実践授業Ⅱの成果

実践授業Ⅱ（50分×1単位時間）の授業実施内容を表 5-7 に示す。ここでは図 5-9 に示した桜島火山防災マップを教材として実践授業をおこなった。そしてその実践授業で使った桜島火山を中心とした始良カルデラの NIR 画像を図 5-11 に示す。さらに実践授業Ⅱを受けた学習者に対しておこなったアンケート結果を表 5-8 に示す。

今回の実践授業に参加した 194 人の学習者に対して、実践授業前にアンケートをとり、その現状を把握しておいた。この事前アンケートにおいて火山防災マップの存在を知っていた学習者の割合は 9.8%であった。このことは、学習者に対して火山防災マップの存在を教えることから始めることが必要であることを示しており、学校教育においてそれをおこなうことが有効な普及方法であることを表 5-8 の質問 1 の回答は示している。質問 2 では火山防災マップの大きさの適否を問うたが、79.6%の学習者は適切であると回答している。質問 3 の火山防災マップに関する実践授業を受講したことによってその内容が理解できたと回答した学習者は 96.3%と、防災授業が火山防災マップを理解させるのに効果的であることがわかる。また質問 4 によって、防災授業を受けた後に火山災害時での避難方法について家庭で話し合った学習者が 100%であった。この結果は防災上重要なことである。実践授業前のアンケートでは、被災した場合の避難方法について家族で話し合った経験を持つ学習者が 22.2%であったが、授業を受けた後には全生徒が家庭で火山災害について話し合ったという成果は、家族のうち一人でも防災教育を受ければ、その世帯全体にその効果が波及する可能性が高いことを示している。学校での火山防災授業の影響が、家庭における火山防災へ波及することを確認できたことは有意義である。

表 5-7 実践授業Ⅱ（桜島火山防災マップを活用した防災授業）の実際

| 桜島火山防災マップを活用した防災授業の実際 |            |  |                                |                                    |   |
|-----------------------|------------|--|--------------------------------|------------------------------------|---|
| 本時の学習内容               |            | 火山防災マップ（火山防災マップ）を活用した桜島の火山噴煙活動   |                                |                                    |   |
| 時間                    | 授業の流れ      | 主な説明・発問の概要   | 予想された反応・活動                     | 教師の指導・支援                           | 留意事項・評価基準   |
| 0                     | スタート<br>導入 | 桜島火山防災マップに関する説明をする。  |                                | ・桜島火山防災マップの見方を丁寧に説明する。             |   |
| 15                    | 火山防災マップの見方 | ①火山防災マップの必要性・目的の説明<br>②地図記号の説明。<br>③溶岩分布の説明。<br>④火砕流の説明。<br>⑤前兆現象の説明。<br>⑥避難手順の説明。<br>⑦噴火警戒レベルと防災対応の説明。<br>⑧過去の4大噴火の概要と近年の主な噴火活動の説明。<br>⑨桜島の火山災害現象の説明。 | ①～⑩を理解する。                      |                                    | ①～⑩をどの程度理解できたか。（特に用語の正確性<br>一火砕流、土石流、溶岩流、噴石、火山弾、火山ガス） |
| 25                    | 大正噴火の説明    | ⑩溶岩流の説明。<br>⑪地震被害の様子。<br>⑫被災者の移住の説明。   | 災害を身近に感じる。                     | できるだけ写真等を活用する。<br>(power point 活用) | どの程度身近に感じることができたか。                                    |
| 40                    | 火山ガスについて   | ⑬火山ガスの高濃度事象が発生していることに関する説明   | 火山ガスについて理解すると同時に環境基準値について理解する。 | 環境基準値やppm, ppb等の単位に習熟させる。          | 火山ガスについてどの程度理解できたか。                                   |
| 50                    | 終了         | ⑭まとめ<br>アンケートに答える  |                                |                                    |   |

次に、質問5の火山防災訓練の必要性については、96.3%の学習者が必要と答えている。火山災害は複合的災害であり、溶岩流・地震・津波・地割れ・火砕流・泥流・山体崩落などによってもたらされた複合的かつ多様な災害が想定される。単純な火山災害イメージから脱却し、多様性のある災害に対して柔軟な対応ができるようになるためには多くの訓練が必要である。しかし実践授業前のアンケートでは火山防災訓練に参加した経験のある学習者は0であった。今回の火山防災授業によって防災訓練に参加する必要性が認識されたことは、防災授業の成果であると思われる。

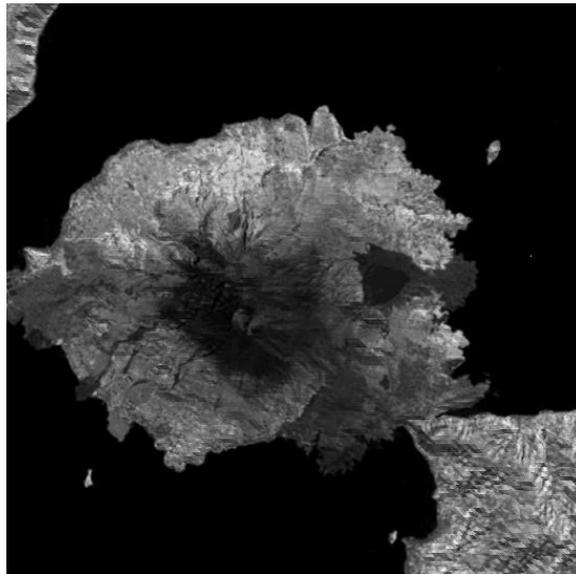


図 5-11 桜島火山の NIR 画像

表 5-8 SiPSE 画像による火山地形授業に対するアンケート結果（実践授業を欠席した学習者及び授業前アンケートをしていない学習者は除外してある）

|     |                                  | はい    | いいえ  | わからない |
|-----|----------------------------------|-------|------|-------|
| 質問1 | 火山防災マップを知っていますか(%)               | 100.0 | 0.0  | 0.0   |
| 質問2 | 火山防災マップの大きさは適切ですか(%)             | 79.6  | 20.4 | 0.0   |
| 質問3 | 火山防災マップの内容を理解できましたか(%)           | 96.3  | 3.7  | 0.0   |
| 質問4 | 家族で避難方法を話し合いましたか(%)              | 100.0 | 0.0  | 0.0   |
| 質問5 | 防災訓練に参加するの必要を感じますか(%)            | 96.3  | 3.7  | 0.0   |
| 質問6 | 火山災害が発生した場合、自分自身は絶対に助かると感じますか(%) | 7.4   | 74.1 | 18.5  |
| 質問7 | 火山防災マップは必要だと思いますか(%)             | 100.0 | 0.0  | 0.0   |
| 質問8 | 火山情報は必要だと思いますか(%)                | 98.1  | 1.9  | 0.0   |

#### 5.3.2.4. 人工衛星画像と火山防災マップを活用した授業実践の考察

ここまでに火山防災マップに記載されている事項に関する学習者の読み取り能力や知識・理解度が低く、これは防災的な観点からみると大きな問題点であることを明らかにした。

この問題点を解決する効果的な方法を調査するために、火山防災教育の実践授業をおこなった。学校でおこなう防災授業において、各教室に備え付けてある情報機器に操作性の良いソフトウェアをインストールし、これを活用することによって効果的な火山地形学習ができることがわかった。また本章は、人間の視覚では検知されないために馴染みの薄い

NIRによる画像と防災マップを活用した火山防災教育によって得られた教育効果が高いものであることを明らかにした。これは情報機器が学校教育の中で大きく活用されている中で、さらに今後大きく発展する可能性を秘めている。火山やその防災に関する学習の際には、可視画像と NIR 画像の特長に留意し、可視画像と NIR 画像を併用することによって、より効果的な火山防災学習が期待できる。また NIR 画像・NIR 3D 画像は火山地形だけでなく段丘・断層などの地形学習に対する教材として利用することもできるため、教室にしながら郷土の地形野外観察活動を効果的におこなうことができる。さらに NIR は水域には吸収されるために、画像上では水域と陸域の境界線を明確に見分けることができる性質を有し、植物のない裸地や都市域、海洋なども NIR の反射が少ないために黒く見える。この特性から植生の活力度などもはっきり理解することができ、火山地形が持つ植生の経年変化も学習者が追うことができる。こうしたことから今後は、NIR 画像・NIR 3D 画像による教育成果を教育関係者などの間で共有・データベース化し、教育実践例を数多く積み上げていくことが大きな課題である。また火山地形教育や防災教育だけでなく、自然地理学や生態学、そしてそれらの教育的分野においても活用できるため、その活用法の研究が推進されるべきであろう。

火山災害の受け手側となる一般市民に防災マップを詳細に読むことができる科学リテラシーを与えることができれば、国や地方自治体、研究者等の防災の担い手側が意図する防災効果を得ることができるようになる。東日本大震災でもみられたが、大きな災害時にはテレビや携帯電話・インターネットなど情報機器や回線が使用できなくなる場合が多く、被災者は自己判断を迫られながら避難しなければならない場合が多い。そこでは集団の中でデマなどが発生しやすい状況が生まれ、被災者は大きな肉体的・心理的困難に直面する。今回の研究において、学校教育の中で NIR 画像と防災マップをあわせた火山防災授業をすることで、火山防災マップの読み取り能力の向上や防災訓練などへ積極的に参加しようという意識を持たせることができることがわかった。また災害のつなぎ手となる防災教育を学習者が受講することによって、その家族への波及効果もあることがわかった。こうした学校での防災教育がつなぎ手に位置づけられ、これがシステム化されれば、大きな防災効果を期待することができると思われる。

しかし喫緊の問題として高校教育の中で地学教育が実施されることが少なくなり、こうした学校教育の中での防災教育は高校の教育現場では実施しにくいことが挙げられる。それゆえこうした取り組みは小・中学校で広く行われることが望ましい。小・中学生に対す

る防災教育の効果の研究や具体的方法の確立、つなぎ手の育成などに多くの問題点が存在するため、これらに関する研究が課題である。

### 5.3.3. 桜島火山 SO<sub>2</sub> ガス濃度変化を活用した授業実践

#### 5.3.3.1. 火山ガス学習の必要性とねらい

桜島島内の各測定局におけるSO<sub>2</sub>ガスの高濃度と風向・風速には明確な関連があり、これを高校地学における防災・気象学習の教材とすることは、火山防災及び気象学習の面から見て多くの意義がある。火山ガスに関して個人に必要とされる防災技能は、平林(2003)によると、(1) 火山および火山ガスについての最低限の知識をもつ、(2) 立て看板に注意し行動する場所の危険性を認識する、(3) 危険区域に立ち入らない、(4) 決められたルートからはずれない、とされている。しかし火山ガスに関する知識や理解がない地域住民が、こうした防災技能の必要性を知ることはないであろう。それゆえ火山の理解とそこから噴出される火山ガスの性質を理解し、そのうえで火山防災マップや火山地形に習熟する学習をすることが必要である。ここでは郷土に根ざした教材である桜島火山から放出されるSO<sub>2</sub>ガスの挙動を学習することを目標として、火山ガス防災に関する基本的な知識・理解を深める実践授業(Ⅲ・Ⅳ)について述べる。

#### 5.3.3.2. 授業実践Ⅲの成果

火山ガスとその防災に関する授業(2010年10月実施、対象学習者数194人)は、全2時間(50分×2単位時間、計100分)を用いておこなった。まず実践授業Ⅲ(50分×1単位時間)では天気図と風向風速の相関に関する授業をおこなった。この時間の学習の主題を「季節に特徴的に見られる気圧配置と風向・風速の理解」と設定し、季節に特徴的な気圧配置の学習をおこない、さらに地形条件を無視できる場合において、各気圧配置にみられる特徴的な風向・風速がどのようなものであるかについて学習をおこなった。また気圧に関する物理単位(hPa)や大気の流れベクトルについても学習し、実践授業で必要な物理的な知識について触れることを心がけた。また、次時の実践授業Ⅳの効果を測定するために学習者の意識を質問紙によって調査した。この結果については6.3.3.4 火山ガス実践授業の結果と考察で述べる。

#### 5.3.3.3. 実践授業Ⅳの方法と教材

実践授業Ⅳ（50分×1単位時間）は火山ガス防災学習とした。また実践授業Ⅳの後、学習者に対して効果測定のための質問紙法アンケートを実施し、学習者の意識変化を把握した。本授業の年間授業計画の中における位置づけと実施時期は表 5-4 に示す。そして授業の流れを表 5-9、実践授業で使用した 2009 年 12 月 14 日の有村局 SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の 1 時間値グラフを図 5-12、2009 年 12 月 13-15 日 9 時の天気図を図 5-13、2009 年 12 月 10 日-18 日の 9 時・21 時における鹿児島地方気象台上空の風向・風速を図 5-14 に示す。そして 2008 年 4 月 6 日 1 時-24 時までの赤水局 SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の 1 時間値グラフを図 5-15、2008 年 4 月 5 日-同年 4 月 7 日 9 時の天気図を図 5-16、2008 年 4 月 3 日-同年 4 月 10 日の 9 時・21 時における鹿児島地方気象台上空の風向・風速を図 5-17 に示す。また 2009 年 8 月 13 日 1 時-同日 24 時までの黒神局 SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の 1 時間値グラフを図 5-18、2009 年 8 月 13 日-同年 8 月 14 日 9 時の天気図を図 5-19、2009 年 8 月 12 日-同年 8 月 14 日の 9 時・21 時における鹿児島地方気象台上空の風向・風速を図 5-20 に示す。

有村局の火山ガス高濃度事象を題材として作成した教材は、2009 年 12 月の昭和火口を中心として活発化した噴煙・噴火活動を背景としている。このとき昭和火口では噴火回数が 143 回記録された（鹿児島地方気象台、2013b）。このうち爆発的噴火が 117 回記録され、これは 2006 年以降最多であった（2011 年 125 回）（鹿児島地方気象台、2013a）ことが知られている。また火口から大気中に放出された火山ガス量は、同月 3、11、18、28 日ではやや多い量である 1,300-2,200 ton/day であったとされている（福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台、2009）。

有村局では、この例でも見られるように、冬型の気圧配置時に 360° 前後の風向で 8 m/sec 以上の風速時に火山ガス放出があると高濃度事象は観測される（木下、1992；木下ほか、1994；木下ほか、1998；坂本・木下、2005）。この火山ガスの高濃度事象と風向・風速の関連性を明確に示す図 5-12～図 5-14 は、学習者が等圧線の向きと気圧配置から風向および火山ガスの移流方向を予測することができるようになるための教材として活用することができることから、今回実践授業の教材として使用した。

表 5-9 2010 年 10 月に実施した実践授業Ⅳの流れ

| 桜島火山 SO <sub>2</sub> ガスの濃度変化を活用した防災教育 |  |   |   |   |   |
|---------------------------------------|--|---|---|---|---|
| 本時の学習目標                               |  | 桜島火山 SO <sub>2</sub> ガスの濃度と天気図の関連性を理解しよう。<br>—高校地学学習として—  |   |   |   |
| 時間<br>(分)                             | 授業の流れ  | 主な発問の概要   | 予想される生徒の<br>反応・活動                           | 教師の指導・支援  | 留意事項・評価<br>基準   |
| 0                                     | スタート<br>導入   | ①SO <sub>2</sub> ガスに関する復習<br>②天気図に関する復習<br>③桜島火山の地形の特徴<br>を把握する。                                      |   |   |   |
| 5                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・図 5-12～<br/>図 5-14 提示</li> <li>・図 5-15～<br/>図 5-17 提示</li> <li>・図 5-18～<br/>図 5-20 提示</li> </ul> | ④ 図 5-12・図 5-13・図<br>5-14・図 5-15 図 5-<br>16・図 5-17・図 5-18・<br>図 5-19・図 5-20 の特<br>徴を把握させる質問を<br>おこなう。 | ④それぞれの天気図<br>の特徴を理解す<br>る。                  | ④天気図は前後 3<br>日間を印刷配付<br>し、また同時に<br>PC でスクリー<br>ンに投影する | ④南低北高、南高<br>北低の気圧配置<br>をしっかりと理<br>解させる(大気<br>の移動が早いこ<br>とに留意する) |
| 10                                    | (1)～(3)におけ<br>る風向・風速の<br>予想  | ⑤ 図 5-13, 図 5-16, 図<br>5-19 の天気図から予想<br>できる桜島上空の風<br>向・風速を考えさせ<br>る。                                  | ⑤卓越風の風向・風<br>速を予想する。                        |   |   |
| 20                                    | 意見発表   | ⑥ 予想した卓越風を発表<br>する。   | ⑥挙手により発表す<br>る。                             |   |   |
| 25                                    | SO <sub>2</sub> ガス濃<br>度による予想<br>の検証   | ⑦ SO <sub>2</sub> ガス濃度の高濃度<br>事象が発生しているこ<br>とをデータ(配付プリ<br>ント)から理解する。                                  | ⑦非常に高い高濃度<br>事象が発生してい<br>るケースがあるこ<br>とを理解する | ⑦数多くある他の<br>近似事例を PC で<br>スクリーンに投<br>影し、一般化す<br>る     | ⑦恒常的に高濃度<br>事象が発生して<br>いるわけではな<br>く、間欠的な火<br>山活動であるこ<br>とに留意する。 |
| 35                                    |  |   |   |   |   |
| 40                                    | アンケート  | ⑧アンケートへの回答を<br>依頼する。  |   |   |   |
| 50                                    | 終了   | ⑨次時の予告をする。  |   |   |   |

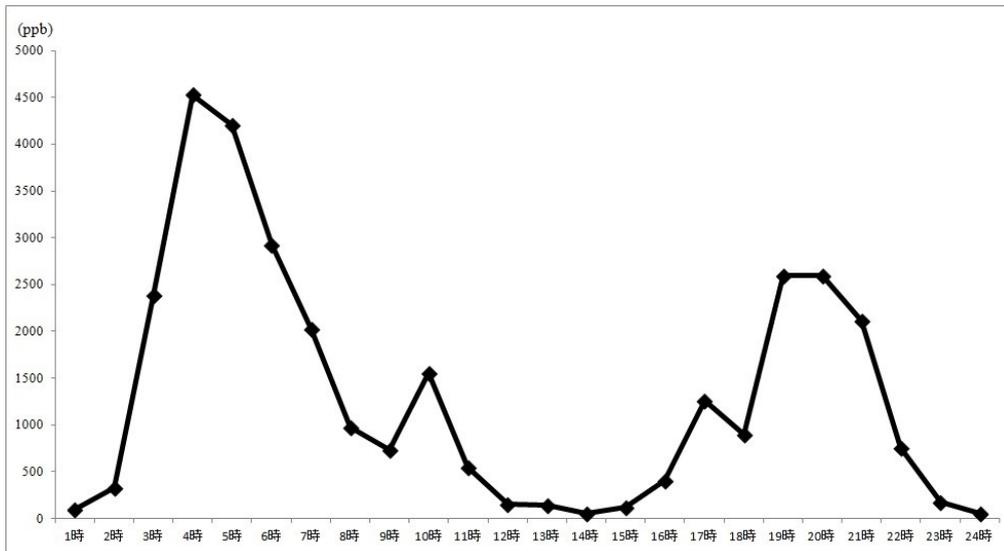


図 5-12 2009 年 12 月 14 日，有村局における SO<sub>2</sub> ガス濃度の 1 時間ごとの推移グラフ

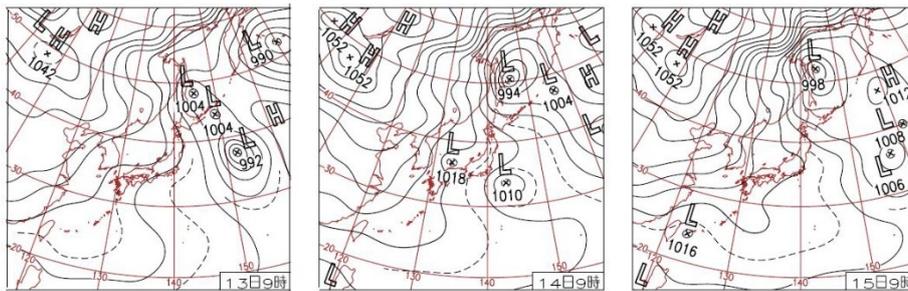


図 5-13 2009 年 12 月 13 日-15 日 9 時における天気図（気象庁，2013a）

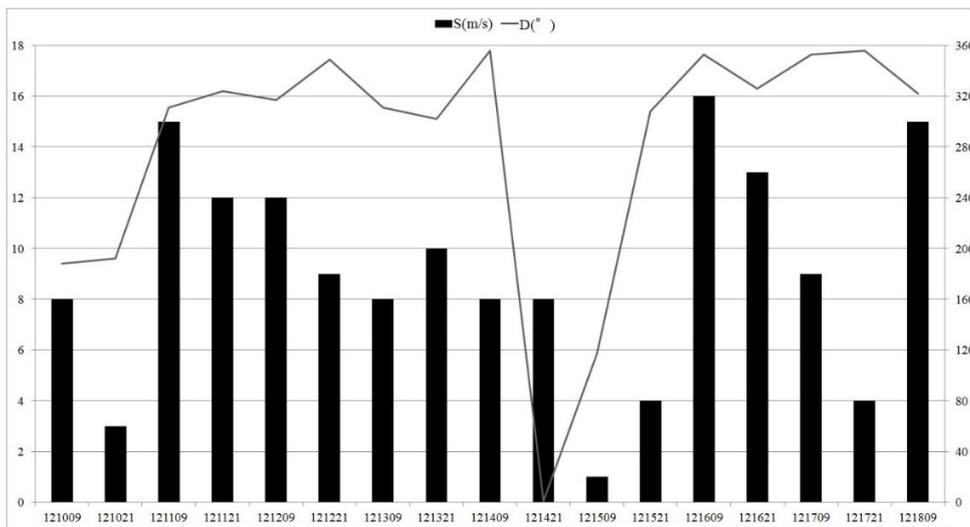


図 5-14 2009 年 12 月 10 日-18 日の 9 時・21 時における鹿児島地方気象台上空の風速(左軸・m/s)・風向(右軸・D°)

次に赤水局の火山ガス高濃度事象を題材として作成した教材は、2008年4月6日15時に発生した火山ガス高濃度事象推移グラフ（最高値 796ppb）と天気図，そしてその前後における鹿児島地方気象台上空の風向・風速グラフである。ここで特徴的な点は、図 5-15 を見てもわかるように、SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が突発的に発生することである。この現象は図 5-16 により低気圧が鹿児島の南の海上を西から東に移動する際に発生する、いわば南低北高の気圧配置時に生じる東風に起因することがわかる（木下，1992；木下ほか，1994；木下ほか，1998；坂本・木下，2005）。また図 5-17 により風向は 120° 前後の風向で 8 m/sec 以上の風速時に火山ガス放出があると高濃度事象は観測されるこの図 5-15～図 5-17 も気圧配置と風向の関係が良く理解でき、天気図を学ぶ際に有効な教材となる。



図 5-15 2008年4月6日1時-24時，赤水局におけるSO<sub>2</sub>ガス濃度の1時間毎の推移グラフ

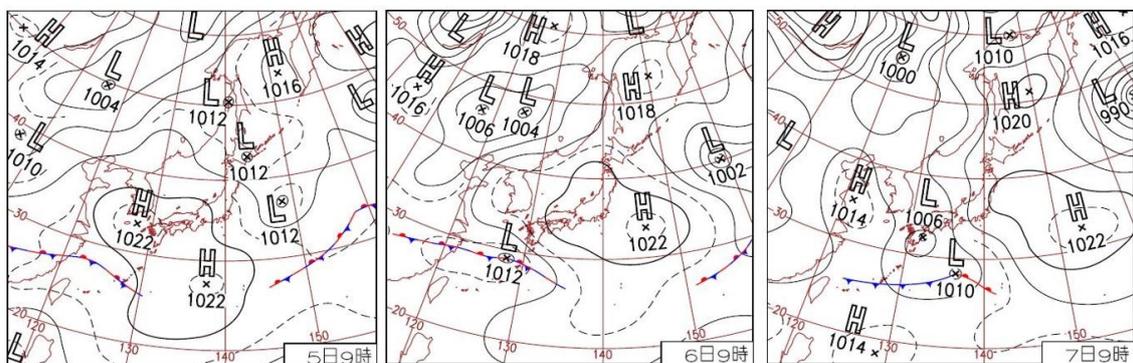


図 5-16 2008年4月5日-7日9時における天気図（気象庁，2013a）

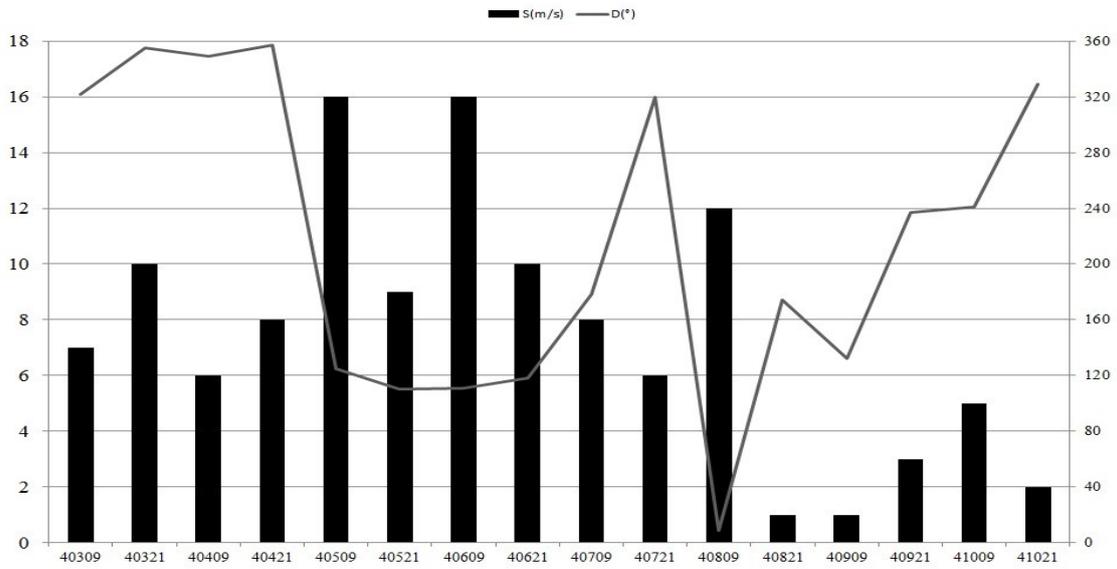


図 5-17 2008 年 4 月 3 日 - 10 日の 9 時・21 時における鹿児島地方気象台上空の風速(左軸・m/sec)・風向(右軸・D°)

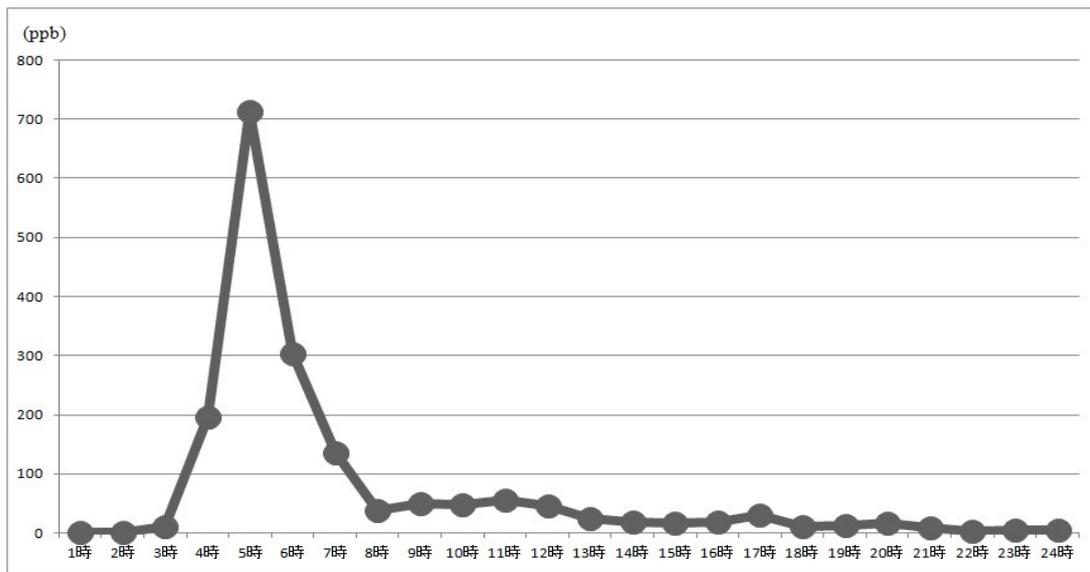


図 5-18 2009 年 8 月 13 日, 黒神局における SO<sub>2</sub> ガス濃度の 1 時間ごとの推移グラフ

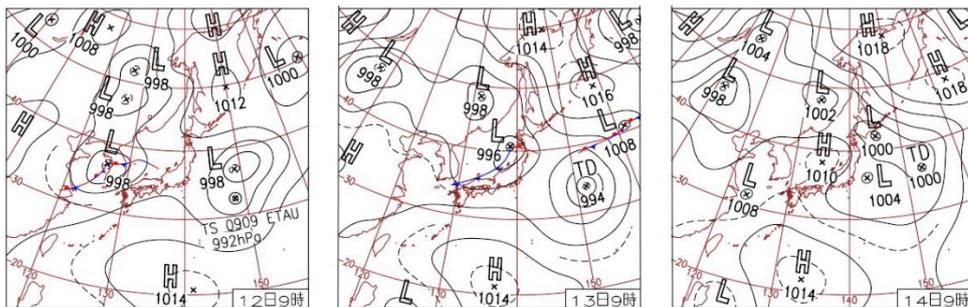


図 5-19 2009 年 8 月 12 日 - 14 日 9 時における天気図 (気象庁, 2013a)

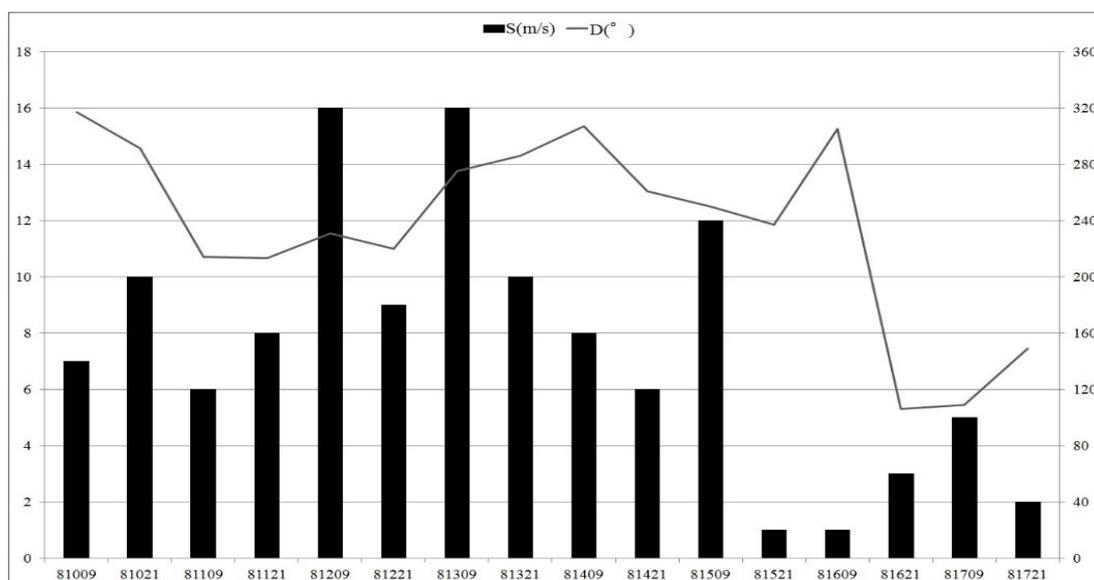


図 5-20 2009 年 8 月 10 日-17 日の 9 時・21 時における鹿児島地方気象台上空の風速(左軸・m/sec)・風向(右軸・D°)

黒神局では、図 5-18 に示したように、2009 年 8 月 13 日 5 時に環境基準の約 7 倍である 714ppb の火山ガス高濃度事象が測定されている。このとき図 5-19 の天気図(気象庁, 2013a)に示されるように 8 月 13 日前後では九州北部を低気圧が通過し、西風から南西の風向であった。また図 5-20 に示したように 13 日 9 時は 16 m/sec と強風であった。一般的に黒神局で高濃度事象が発生するときは、気圧配置が南高北低であり、風向がおおよそ 250°前後、風速は 925 hPa を示す高度で 10 m/sec を超えていることが多いことがわかっている(木下, 1992; 木下ほか, 1994; 木下ほか, 1998; 坂本・木下, 2005)。低気圧の通過による高濃度事象であるため、有村局のように高濃度事象が長時間続くことは少ないが、山頂からの吹きつけにより短時間に非常に大きな数値を示す可能性が考えられる。この図 5-18~図 5-20 も学習者が等圧線の向きと気圧配置から風向を予測することができるようになる教材である。以上の教材を用いて 2010 年 10 月に表 5-9 の方法で実践授業Ⅳをおこなった。

#### 5.3.3.4. 火山ガス実践授業の結果と考察

実施した実践授業Ⅳに対する学習者の評価を、2006 年から 2010 年の 5 カ年にかけて、合計 194 人の鹿児島市立鹿児島玉龍高校(普通科)2 年生地学Ⅰ選択者を対象に質問紙調査によって測定した。このアンケート結果を表 5-10 に示す。本章では 2010 年に使用した

火山ガス防災教育の実践授業教材を示したが、これまで一年ごとに教材は更新している。

表 5-10 2006年-2010年に実施した実践授業のアンケート結果

|     |  |       |         |        |
|-----|--|-------|---------|--------|
| 設問1 | 天気図を見て、天気を予測できるか。                            |       |         |        |
|     | (n = 194)                                    |       |         |        |
|     | 授業前  |       | 授業後     |        |
|     | できる  | 22.7% | できる     | 68.0%  |
|     | だいたいできる                                      | 44.3% | だいたいできる | 29.9%  |
|     | できない   | 33.0% | できない    | 2.1%   |
| 設問2 | 天気図から風向・風速を予測できるか。                           |       |         |        |
|     | (n = 194)                                    |       |         |        |
|     | 授業前  |       | 授業後     |        |
|     | できる  | 16.5% | できる     | 62.4%  |
|     | おおよそできる                                      | 39.2% | おおよそできる | 33.5%  |
|     | できない   | 44.3% | できない    | 4.1%   |
| 設問3 | それぞれの季節に特徴的に見られる気圧配置がわかるか。                   |       |         |        |
|     | (n = 194)                                    |       |         |        |
|     | 授業前  |       | 授業後     |        |
|     | できる  | 10.8% | できる     | 80.9%  |
|     | だいたいわかる                                      | 62.4% | だいたいわかる | 14.4%  |
|     | わからない  | 26.8% | わからない   | 4.6%   |
| 設問4 | 桜島火山からSO <sub>2</sub> ガスが放出されていることを知っているか。   |       |         |        |
|     | (n = 194)                                    |       |         |        |
|     | 授業前  |       | 授業後     |        |
|     | 知っている  | 11.9% | 知っている   | 100.0% |
|     | 知らない   | 88.1% | 知らない    | 0.0%   |
| 設問5 | 桜島火山からSO <sub>2</sub> ガスが流下する方向が天気図から予想できるか。 |       |         |        |
|     | (n = 194)                                    |       |         |        |
|     | 授業前  |       | 授業後     |        |
|     | できる  | 8.8%  | できる     | 86.6%  |
|     | だいたいわかる                                      | 12.4% | だいたいわかる | 9.8%   |
|     | わからない  | 78.9% | わからない   | 3.6%   |

表 5-10 の設問 1 は、実践授業Ⅳの前に「天気図を見て、天気を予測できるか」と問うたところ、「できる」と回答した学習者が 22.7%、「だいたいできる」と回答した学習者が 44.3%、「できない」と回答した学習者が 33.0%であったのだが、実践授業後には「できる」と回答した学習者が 68.0%、「だいたいできる」と回答した学習者が 29.9%、「できない」と回答した学習者が 2.1%となったことを示している。さらにクロス集計をおこない詳

細にアンケート結果を検討すると、この実践授業前に「だいたいできる」と回答した44.3%の学習者86人のうち、実践授業後に「できる」となった学習者は82人であり、4人がそのまま「だいたいできる」であった。また実践授業前に「できない」と回答した学習者64人のうち、実践授業後に「できる」と回答した学習者が5人、「だいたいできる」と回答した学習者が52人、「できない」とそのままだった学習者が4人であった。これは学習者の天気図の読み取り技能が向上したという意識が大きく高まっていることを示している。

設問2は、天気図と風向・風速を比較することによって、そこから風向・風速が予測できるようになった学習者が飛躍的に増加している。「できる」「おおよそできる」が実践授業の前後で40.2%増加した。これもクロス集計をおこないアンケート結果を詳細に検討すると、この実践授業前に「だいたいできる」と回答した39.2%の学習者76人全員が、実践授業後に「できる」と回答した。また実践授業前に「できない」と回答した44.3%の学習者86人のうち、実践授業後に「できる」と回答した学習者が13人、「だいたいできる」と回答した学習者が65人となった。これは天気図中の等圧線から風向・風速を推測する能力が向上したことを示していると考えられる。

設問3では「西高東低」など、季節に特徴的な気圧配置の理解を問うものであるが、「だいたいわかる」が実践授業の前後で48.0%減少し、「できる」が70.1%増加している。これもクロス集計をおこないアンケート結果を詳細に検討すると、この実践授業前に「だいたいわかる」と回答した62.4%の学習者121人のうち、実践授業後に「わかる」と全員が回答し、実践授業前に「わからない」と回答した26.8%の学習者52人のうち、実践授業後に「わかる」と回答した学習者が15人、「だいたいわかる」と回答した学習者が28人、「わからない」とそのままだった学習者が9人であった。学習者の感想としては「概論として学ぶより、自分自身の身の回りの現象として学んだ方が理解しやすい」という記述があった。

設問4では桜島火山からSO<sub>2</sub>ガスが放出されていることを授業前においては知らない学習者が88.1%いた。火山防災マップに記載されている用語に習熟していない学習者が多いことはこれまでも指摘されていた(坂本, 2007d)が、防災マップを作成・配付するだけでなく、そこに記載されている用語や現象について正確な知識を持つ学習者を育成する必要があると思われる。

設問5では、SO<sub>2</sub>ガスの移流方向を天気図からおおよそ予想することができるようにな

ったと考える学習者（「できる」及び「だいたいできる」）が 75.2%と大きく増加したことがわかる。鹿児島のだざまなメディアが火山の噴煙の移流方向を報道するが、いったん自然災害が発生すると停電等でテレビ・PCなどの一般的な情報機器が使用できなくなる可能性が非常に高い。また災害時有線通信によって携帯電話は規制される場合も考えられる。その上これまで多くの自然災害で見られたように流言などの発生（市口，2011）も懸念される。それゆえ市民が被災した場合，自分自身の能力によって災害のあらゆる面を判断し，それを基にして最適な行動ができる能力の向上，いわゆる防災リテラシーの向上が急務である。この観点から天気図等から桜島火山から放出される SO<sub>2</sub> ガスの移流方向を判断するスキルを身につけることができたことは，大きな教育効果であった。授業後の学習者の感想にも「地元の気象にはとても関心がある。連日，桜島の降灰方向の予測が地元のテレビニュースで報道されるが，今回の授業でその原理が理解できた」というものがあった。

#### 5.4. 本章の考察とまとめ

桜島火山防災マップをはじめ，行政等が作成した火山災害ハザードマップには火山防災に関する専門的な用語が多く記載されており，これを本来の目的に沿うよう活用するためには火山防災用語に関する基本的な知識がなければならない。それゆえこれを地域住民に配付しただけでは行政が意図している防災効果を得ることはできない。本章では学習者を対象に，火山防災マップに記載されている用語や記載事項に関する理解度を調査したが，その結果，回答者（学習者）には火山防災マップの目的を達成することができる理解度はなく，行政や研究者等の火山防災の担い手側から発せられる火山災害に関する情報が十分であっても，受け手側にそれを処理する十分な能力は備わっていない現状であると判断した。ここに火山防災に関する大きな問題点がある。

次に長期間にわたって継続した三宅島火山の SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象災害を例に，今後発生する可能性がある桜島火山ガス災害にどのように対応するかは大きな課題である。桜島島内の火山ガス高濃度事象は，風向・風速と関連性が強く，天気図を見るとおおよそ SO<sub>2</sub> ガスの移流方向の予測ができる。この現象を教育的に利用することによって，火山ガスの防災教育の教材を作成し，効果的な防災教育を実施することができる。

本章により，次の(1)～(7)が明らかになった。

- (1) 本章の研究によると、火山防災マップに関して学習者の約半数以上は「知らない」もしくは「聞いたことはあるが意味は知らない」と回答した。しかしこれを用いた火山防災に関する実践授業を受講することによって、学習者は火山防災マップを理解できたと考えるようになる。
- (2) 火山防災に関連する学習者の知識は少なく、そのほとんどは火山防災に関する技能や避難訓練等の経験を持っていない。そのため行政や研究者等の火山防災の担い手側から発せられる火山災害に関する情報が十分にあっても、受け手側である学習者にはそれを処理する能力が十分に備わっていない。
- (3) 火山防災に関する実践授業を受けた学習者は、後に災害時の避難方法について家庭で話し合う率が高い。火山防災授業の家庭への波及効果があることがわかる。
- (4) 火山防災に関する実践授業を受講した学習者は、火山防災訓練の必要性について理解をする率が高い。火山災害は複合的災害であり、溶岩流・地震・津波・地割れ・火砕流・泥流・山体崩落などによってもたらされた複合的かつ多様な災害が想定される。単純な火山災害イメージから脱却し、多様性のある災害に対して柔軟な対応ができるようになるためには学習が必要である。
- (5) NIR 画像及び NIR 3D 画像を用いた高校地学教育では、可視画像よりも火山地形を俯瞰するのに適している場合があり、SiPSE を活用すれば操作性も良く、俯瞰したい画像を俯瞰したい角度から見るができるため、その学習効果は高い。
- (6) 桜島火山から放出された SO<sub>2</sub> ガスの高濃度事象とその時の気圧配置、風向・風速には相関が見られ、火山防災・気象教育をする際の教材ができる。
- (7) 火山ガス災害が発生したとき、この火山ガスに関する実践授業を受講した学習者は、天気図からその移流方向を予測することができるようになる。これは自分自身の能力によって災害のあらゆる面を判断し、それを基にして最適な行動ができる能力の向上、いわゆる防災リテラシーの向上のきっかけとなる。

## 第6章 結論

### 6.1. 本研究の総括

本研究では、桜島火山における火山ガス高濃度事象と NIR 画像による火山地形に焦点をあて、この自然災害に対する有効な防災教育について以下の点を明らかにした。

#### (1) 火山ガス防災

桜島島内の南に位置する有村局で測定された SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、2001 年～2012 年に発生した全測定局における SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象の 62% を占める。島内 4 測定局で測定される SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は、気圧配置や火口上空の強い風速や風向と密接な関係がある。この SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象は強風下では下流域に向かって長距離移流する場合があります。桜島島内だけでなく、広く南九州全域で警戒が必要であろう。こうした火山ガスの挙動は、風向・風速と関連性が高いため、防災情報や防災教育に活用しやすい。また弱風下で桜島火山が活発に活動する際、上空の大気中に放出された SO<sub>2</sub> ガスは、地上の空気と対流混合を起し、SO<sub>2</sub> ガスが地上付近にゆっくりと降りてくる。この SO<sub>2</sub> ガスは地上風の影響を受けやすいため、あらゆる方向で高濃度事象が発生させる場合があることも本研究で明らかになった。さらに本研究では SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象と SPM 量高濃度事象、そして SPM 量高濃度事象と降灰量の相関を論じた。これにより特に有村局では SO<sub>2</sub> ガス高濃度事象が増加するにしたがって SPM 量高濃度事象や降灰も大量に発生する可能性が高いことがわかった。それゆえこれらに対する火山防災は、個々の災害素因に対応する対策を立てるだけでなく、複合的な災害になる可能性があることを想定し、多様な組み合わせに対応することができる防災対策をおこなう必要がある。

#### (2) NIR 画像・NIR 3D 画像の教育利用

インターネットを通して容易に取得できる方法が確立している NIR 画像は、水域と陸域の境界線を明確に見分けることができ、さらに植生もはっきり識別することができる。また火山地形に特徴的な下方・側方への開析を識別しやすく、NIR 3D 画像では段丘・断層などの俯瞰も容易で、火山地形の特徴を把握するのに有効である。中でも NIR 画像・NIR 3D 画像によって活火山の地形を俯瞰する場合、風化・侵食による地形の特徴を明瞭に写し出し、火山ガス等による植生の程度も表現することができる場合があるため、活火山地形の特徴を効果的に表現することができる。カルデラ地形に特徴的な中央火口丘やその風化の程度も明瞭に識別することができる。NIR 画像・NIR 3D 画像による

火山地形学習とあわせて火山防災マップを用いた防災学習をおこなうと、学習者には火山地形や火山用語がイメージしやすくなり、その理解に役立つことが明らかになった。

### (3) 火山防災教育

本研究では学習者（高校生）を対象として、火山防災マップに記載されている用語や記載事項に関する理解度を調査した。その結果、学習者は火山防災マップの目的を達成することができる技能（火山防災に関するスキル）をほとんど有しなかった。仮に行政や研究者等の火山防災の担い手側から発せられる火山災害に関する情報が十分であっても、受け手側である高校生にはこれを理解し、冷静に活用するのに必要な火山防災リテラシー（火山防災に関する能力）は備わっていないと思われる。しかし本研究で実施した火山防災に関する実践授業を調査対象の高校生に実施すると、溶岩流・地震・津波・地割れ・火砕流・泥流・山体崩落などによってもたらされた複合的かつ多様な災害を理解し、これまで持っていた単純な火山災害イメージから脱却し、火山防災マップの内容が理解できるようになった。そして火山ガス高濃度事象による災害が発生したとき、火山ガス高濃度事象と気象に関する実践授業を受講した学習者は、天気図からその移流方向を予測することができるようになり、火山ガス災害について考えることができる自己判断力を持つようになった（図 6-1）。

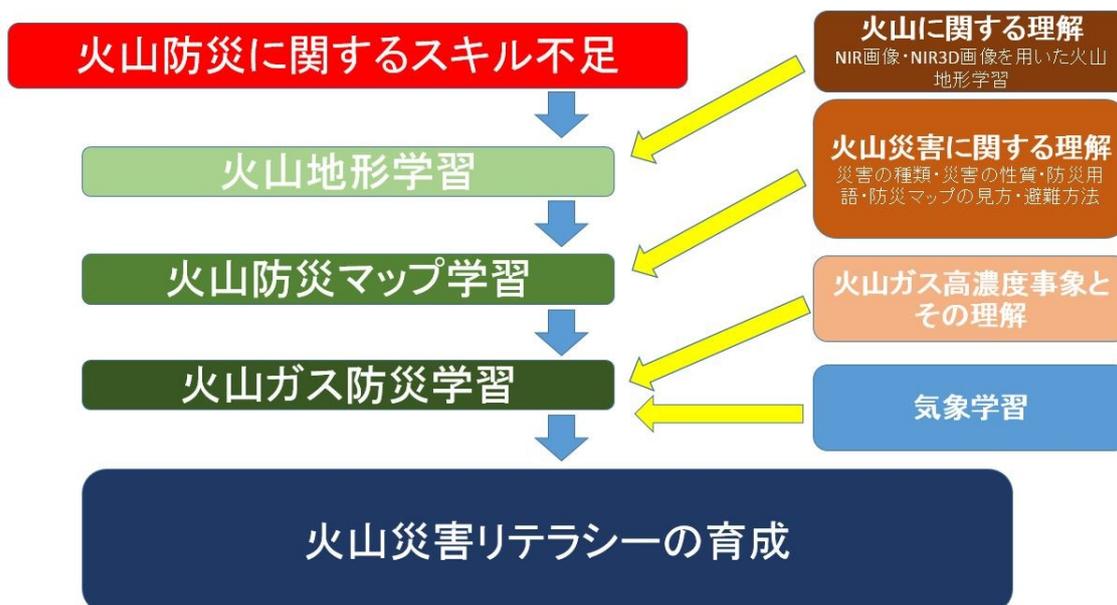


図 6-1 火山防災学習の概略図

## 6.2. 火山防災システムの構築

火山災害は、それを引き起こす素因が同時多発的に発生することが十分想定でき、それにより複合的な自然災害になる可能性が高い（陶野，1993）。火山における具体的な災害素因は、一次災害としては溶岩流、火砕流、土石流、噴石、降灰、山体崩壊、火山性地震、爆風、火山ガス（CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>等）、二次災害として津波や洪水、疫病や飢饉などが考えられ、これらに対する防災対策は個々の現象に対するものだけでは十分ではない。

火山災害はそれぞれの火山が持つ性質や歴史によって大きく異なるため、そのリスク評価を数値化することには多くの困難がともなう。小山（2014）は、低頻度巨大災害である火山災害のリスク評価をハザードの大きさ（被災人口）と生起確率（発生間隔）の積と単純化し、さらに「10万年に1度より稀な災害は諦める」ことを提唱している。例えば小惑星の衝突や太陽系の近距離での超新星爆発などは数千万年に1度の程度の現象であるが、一度発生すると「破局的災害」となる。しかしこうした対策の取りようもない破局的な災害は諦め、現実的に対応可能な範囲を想定し災害対策をおこなうべきであると述べている。こうした視点を用いて、環境省が定めた環境基準を基にした火山ガス災害や本研究で明らかにしたSPM高濃度事象を考察すると、その災害リスクは他の災害と比較して極端に高い。しかしこの高頻度災害である火山ガスやSPM高濃度事象がもたらすリスクは、社会の中では低く認識される場合が多く、火山防災マップなどに記載されない場合や記載されても小さな扱いである場合が多い（図6-2）。

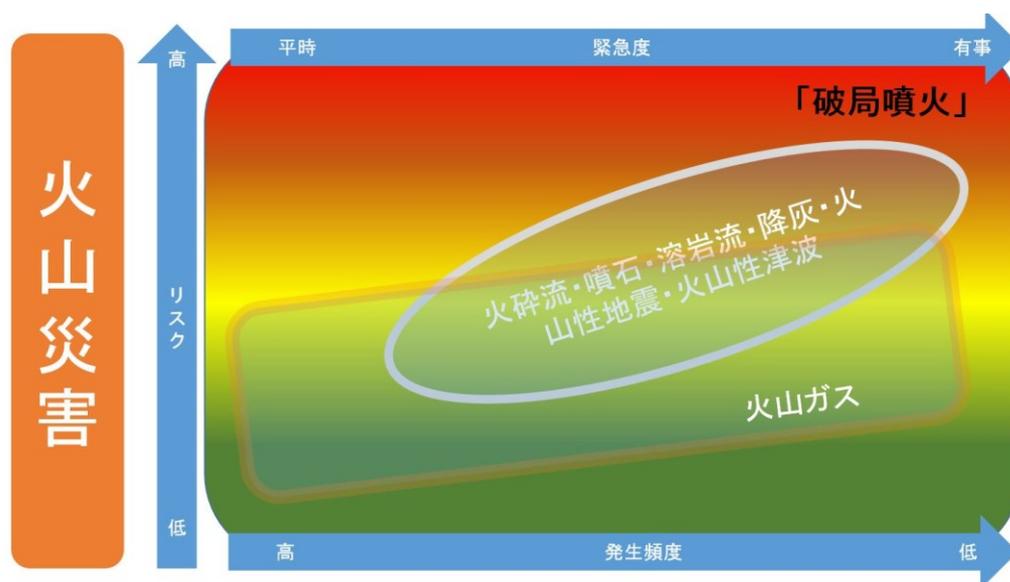


図 6-2 火山災害の発生頻度と一般的なリスク認識の相関に関する概念図

行政レベルにおける火山防災の水準は、最先端の火山学や地球物理学から得られた知見を取り入れ、さらに防災科学の研究者の意見を取り入れつつ高いものを保っている。そこから作成された火山防災マップは、それぞれの火山の特徴を十分に精査し、過去の火山災害の実態に適合した内容となっている。しかし2000年の三宅島雄山火山のように、これまで記録・観測されてこなかった新たな災害（火山ガス災害）が突如として発生する場合も十分にあり得る。

地域住民用の火山防災マップに記載されている火山防災に関する用語を高校生が理解することは困難であり、その作成意図や内容を理解するためには火山防災学習が必要である。これがなければ火山災害に対する研究者や防災担当者といった火山防災の担い手側が発する防災・減災に関する情報や避難に関する命令・指示が、火山災害の受け手側となる高校生たちには十分に伝わらないことを本研究では明らかにした。さらに火山災害に対するリテラシーを持たないため、これまでの前例のない火山災害にであうと対応することができないと思われる。それゆえ担い手と受け手に介在する大きな隔たりを埋めこれを有機的に結ぶために、学校教育をつなぎ手と位置づけ（図6-3）、本研究では学習者に火山防災リテラシーを身につけさせる効果的な実践授業の在り方を考察した。



図 6-3 本研究で考察した新しい火山防災の概略図

台風や地震といった自然災害とは異なり、火山災害は低頻度巨大災害であることが多い。それゆえこれを実際に経験したことのある行政の防災担当者や地域住民は非常に少ない。この災害がいったん発生すると、経験不足である担い手側と受け手側には持っているスキルの差によって避難や情報伝達、復興の場面においてさまざまな齟齬が生じる可能性が十分に予測できる。双方とも平時から火山災害に対する強い意識と緊張感を持ち、担い手側と双方向の強い繋がりを持つ受け手を育成するためには、年間を通して常に受け手側に刺激を与えることができる学校教育がその役（つなぎ手）として最適であろう。

さらに社会全体が火山災害に強くなるためには、学校教育の場だけでなく、成人・外国人・旅行者・災害弱者といったさまざまな受け手に対するつなぎ手の存在も必要である。この役割はジオパークを舞台とした NPO 法人等を位置づけることも可能かもしれない。今後の課題とする。

## 謝 辞

本論文の執筆するにあたり、その機会を与えていただき、加えて論文の構成において多大なご指導とご鞭撻を賜りました鹿児島大学法文学部自然地理学教室の森脇 広教授に深甚な感謝をいたします。また、鹿児島大学大学院修士課程在籍時より長年にわたって有益なご指導・ご鞭撻を賜り、さらに多くの励ましをくださいました鹿児島大学教育学部物理学教室の木下紀正名誉教授に衷心から感謝とお礼を申し上げます。

本論文の作成過程において、鹿児島大学法文学部城戸秀之教授、竹岡健一教授には有益なるご指導、ご教示をいただきましたことに心より感謝いたします。

本研究をおこなうにあたり、鹿児島県環境林務部環境保全課、鹿児島県危機管理局危機管理防災課、鹿児島市環境局環境保全課、鹿児島市市民局安心安全課のみなさまには、火山ガス・SPM・降灰量データ等の貴重な測定データを、そして火山防災マップ、火山災害に関する情報等の提供を受けました。衷心より感謝申し上げます。また京都大学防災研究所付属火山活動研究センター井口正人教授、気象庁、福岡管区気象台火山監視・情報センター、鹿児島地方気象台、国土交通省九州整備局大隅河川事務所のみなさまには多くのアドバイスやデータの提供を受けました。心から感謝申し上げます。

本研究を遂行していくにあたり、鹿児島大学教育学部八田明夫名誉教授、鹿児島大学教育学部三仲 啓教授、土田 理教授は、研究成果につながる素晴らしいアドバイスと研究環境を与えて戴きました。この場を借りてお礼申し上げます。

鹿児島大学・熊本大学噴煙火山ガス研究グループの熊本大学教育学部飯野直子准教授、熊本県立熊本支援学校金柿主税氏をはじめとする研究グループのみなさま、鹿児島大学SiPSEグループの戸越浩嗣氏、富岡乃夫也氏、教育学部物理学教室のみなさまには二酸化硫黄高濃度事象や近赤外衛星画像について多くのご議論を戴きました。感謝申し上げます。

今回の研究を進めるにあたって、鹿児島市立鹿児島玉龍中学校および鹿児島玉龍高校の生徒・教職員のみなさま、鹿児島県立博物館職員のみなさまには多くのご協力をいただきました。この場を借りて謝意を申し上げます。

最後に本研究を進めるにあたり、これまで協力してくれた家族に感謝いたします。特に

自分のこと以上に著者の健康管理に注意し、時には良き相談相手になってくれた妻美保子と、著者の心の支えとなってくれた息子耕介、2002年に病気で他界するまで筆者のことを心配してくれた父哲也、これまで辛抱強く支援をしてくださった母恒子に深い感謝の意を表して謝辞といたします。

## 引用文献

- 秋田さきがけ新報社 (2005) : 重体の父親も死亡. 12月31日朝刊.
- 荒牧重雄 (1968) : 加久藤盆地の地質—えびの・吉松地域の地震に関連して—. 地震研彙報, **46**, 1325-1343.
- 荒牧重雄・宇井忠英 (1966) : 阿多火砕流と阿多カルデラ. 地質学雑誌, **72**, 337-349.
- 第四紀学会 (2011) : 高等学校理科4科目の開講についての要望書. 第四紀学会ウェブサイト (最終閲覧日: 2012年12月5日) <http://quaternary.jp/news3/education.html>
- 独立行政法人科学技術振興機構理科教育支援センター・国立教育政策研究所教育課程研究センター (2008) : 平成20年度中学校理科教師実態調査集計結果 (速報). 理科教育支援センターウェブサイト. 172pp. (最終閲覧日: 2012年12月1日).  
<http://rikashien.jst.go.jp/>
- 遠藤邦彦・千葉達朗・谷口英嗣・隅田まり・太刀川茂樹・宮原智哉・宇野リベカ・宮地直道 (1987) : テフクロロジーの手法に基づく1986~1987年伊豆大島噴火の経緯と噴出物の特徴. 火山, **33**, 伊豆大島噴火特集号, 32-51.
- 藤野直樹・小林哲夫 (1997) : 開聞岳火山の噴火史. 火山, **42**, 195-211.
- 福岡管区気象台・鹿児島地方気象台 (2006) : 臨時火山情報1号. 6月12日18時35分.
- 福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台 (2009) : 桜島の火山活動解説資料 (平成21年13月). (最終閲覧日: 2012年12月10日).  
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/>
- 福岡管区気象台火山監視・情報センター・鹿児島地方気象台 (2014) : 諏訪之瀬島の火山活動解説資料 (平成25年12月). (最終閲覧日: 2014年1月26日).  
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/>
- 袴田和夫 (1981) : 箱根仙石原の地質と編年. 大涌谷自然科学館研究報告, **1**, 1-10.
- 波多江信広 (1955) : 鹿児島県宇治群島および草垣島の地質. 地学雑誌, **64**, 14-26.

- 早川由起夫・宮永忠幸 (2008) : 中学理科で使う火山教材と野外観察の方法. 群馬大学教育学部紀要, 自然科学編, **56**, 85-95.
- 林 信太郎 (2006) : 世界一おいしい火山の本ーチョコやココアで噴火実験. 小峰書店, 127pp. 東京.
- 東日本大震災を受けた防災教育・防災管理等に関する有識者会議 (2012) : 「東日本大震災を受けた防災教育・防災管理等に関する有識者会議」最終報告. 20pp. 文部科学省 HP. (最終閲覧日 ; 2014 年 3 月 15 日) [http : //www.mext.go.jp/](http://www.mext.go.jp/)
- 平林順一 (2003) : 火山ガスと防災. 日本質量分析学会誌, **51**, 119-124.
- 平沢晃一・松本幡郎 (1983) : 鹿児島県トカラ列島諏訪之瀬島の火山地質. 火山, **28**, 101-115.
- 菱山剛秀・政春尋志 (1998) : 火山ガス災害危険箇所の地形条件. 国土地理院時報, **90**, 79-85.
- 星住英夫・宇都浩三 (2000) : 雲仙火山の形成史. 月刊地球, **22**, 237-245.
- 細山田三郎・木下紀正 (1994) : 鹿児島市北東部における雨量観測と鹿児島 8.6 豪雨. 鹿児島大学教育学部研究紀要, 自然科学編, **45**, 75-89.
- 井口正人・高橋鐵朗・山崎友也・多田光宏・鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾 茂 (2008) : GPS 観測から明らかになった桜島のマグマ活動. 京都大学防災研究所年報, **51**, 241-246.
- 市口恒雄 (2011) : 災害時にもロバストで有効な情報伝達手段. 科学技術動向, 2011 年 6 月号, 8-20.
- 飯野直子・木下紀正 (1996) : 桜島噴煙の衛星画像の鉛直シヤーモデルによる検討. 鹿児島大学教育学部研究紀要, 自然科学編, **47**, 1-17.
- 飯野直子・木下紀正・小山田 恵・金柿主税・寺田暁彦 (2002) : 三宅島山麓における火山ガス濃度変動と帰島問題. 第 21 回日本自然災害学会学術講演概要集, 145-146.
- 飯野直子・小山田 恵・木下紀正・金柿主税 (2003) : 三宅島の衛星画像と火山ガス高濃度事象. 南太平洋海域調査報告, **37**, 66-75.

- 飯野直子・芝 貴章・矢野利明・木下紀正 (2004) : 植生指数画像による三宅島島内火山ガスハザードマップの試作. 第 36 回リモートセンシング学会学術講演会論文集, 33-34.
- 井村隆介 (1991) : 諏訪之瀬島火山の最近 200 年間の噴火堆積物－火山砂層による噴火活動の消長の評価－. 地質学雑誌, **97**, 865-868.
- 井村隆介 (1994) : 霧島火山の地質. 地震研彙報, **69**, 189-209.
- 井上公夫 (1999) : 1792 年の島原四月朔地震と島原大変後の地形変化. 砂防学会誌, **52**, 45-54.
- 石原和弘 (2005) : 桜島の火山防災マップ, 月刊地球. **27**, 396-399.
- 石原和弘 (2006) : 桜島火山防災マップの改訂について. 自然科学, **25**, 251-252.
- 一色直記 (1984) : 大島地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), 地質調査所, 133pp.
- 伊藤順一・星住英夫・巖谷敏光 (1997) : 姫島地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 74pp.
- 鹿児島地方気象台 (2013a) : 桜島の月別爆発回数. (最終閲覧日 : 2013 年 9 月 26 日).  
<http://www.jma-net.go.jp/>
- 鹿児島地方気象台 (2013b) : 桜島の月別噴火回数. (最終閲覧日 : 2013 年 9 月 26 日).  
<http://www.jma-net.go.jp/>
- 鹿児島県 (2011) : 大気・騒音調査結果. (最終閲覧日 : 2014 年 3 月 25 日).  
<http://www.pref.kagoshima.jp/>
- 鹿児島県危機管理局危機管理防災課 (2010) : 桜島降灰量観測結果 (H5～H19). (最終閲覧日 : 2013 年 9 月 29 日)  
<http://www.pref.kagoshima.jp/aj01/bosai/sonae/sakurajima/sakurajimakouhairyou.html>
- 鹿児島県危機管理局危機管理防災課 (2013) : 桜島降灰量観測結果 (H20～). (最終閲覧日 : 2013 年 9 月 29 日)  
<http://www.pref.kagoshima.jp/aj01/bosai/sonae/sakurajima/sakurajimakouhairyou2.html>

- 鹿児島県危機管理局危機管理防災課桜島大正噴火 100 周年事業実行委員会 (2014) : 桜島大正噴火 100 周年記念誌. 163pp.
- 鹿児島市・垂水市・桜島町 (1994) : 住民啓発型桜島火山防災マップ.
- 鹿児島市安心安全課 (2006) : 住民啓発型桜島火山防災マップ, 桜島の立入禁止区域の拡大について.
- 鹿児島市危機管理課 (2010) : 住民啓発型桜島火山ハザードマップ.
- 鎌田浩毅・星住英夫・小屋口剛博 (1988) : 中部九州ー中国地方西部の火山フロントの形成年代. 月刊地球, **10**, 568-574.
- 鎌田政明・小沢竹二郎・村上悠紀雄・吉田 稔 (1985) : 地熱流体の化学ー環境科学の視点から. 東京大学出版会, 232pp. 東京.
- 環境庁 (1973) : 大気汚染に係る環境基準について. 昭和 48 年 5 月 8 日, 環境庁告示 25 号.
- 加藤洋一・森崎澄江・野上文史 (1995) : 九重硫黄山噴火に伴う大気環境影響について, 大分県衛生環境研究センター年報, **23**, 72-74.
- 火山防災対策の推進に係る検討会 (2012) : 火山防災対策の推進に係る検討会 とりまとめ. 内閣府, 16pp, 東京.
- 木下紀正 (1992) : 火山噴煙の観測と解析, 気象利用研究, **5**, 51.
- 木下紀正 (1996) : 火山噴煙の上昇と移流・拡散. 可視化情報, **16**, 230-235.
- 木下紀正 (2001) : 火山ガスの正しい理解をー三宅島噴煙活動をめぐってー. 科学, **10**, 1277-1279.
- 木下紀正編 (2003) : 「列島火山の噴煙活動を探る」. 南太平洋海域調査研究報告, **37**, 192pp. 鹿児島.
- 木下紀正・今村和樹・金柿主税 (1994) : 桜島山麓における二酸化硫黄高濃度時の風系, 第 13 回風工学シンポジウム論文集, 79-84.
- Kinoshita, K., Ikebe, S. and Isogai, K. (1997) : Satellite Observation of volcanic Phenomena in Kyushu, Japan. Bull. Fac. Ed., Kagoshima Univ., Natural Sci. **48**, 37-63.

- 木下紀正・飯野直子 (1998) : 爆発噴煙の発達と移流, 火山ガスと噴煙の大気拡散解析, 平成8年度～平成9年度科学研究費補助金研究成果居報告集, 34-37.
- 木下紀正・池辺伸一郎・金柿主税・直江寛明・今村和樹 (1998) : 高濃度火山ガスの動態と気象条件. 自然災害科学研究西部地区部会報・論文集, **22**, 133-138.
- 木下紀正・小山田 恵・金柿主税・飯野直子 (2001) : 三宅島火山ガスの動態と気象条件. 自然災害科学研究西部地区部会報, **25**, 145-148.
- 木下紀正・八田明夫・松井智彰・富岡乃夫也・戸越浩嗣・池辺伸一郎 (2002) : 衛星画像立体表示で観る西日本の火山地形. 日本リモートセンシング学会第33回学術講演会論文集, 7-10.
- 木下紀正・富岡乃夫也・戸越浩嗣 (2005) : SiPSEによる3D衛星画像の作り方と読み方. 古今書院, 126pp. 東京.
- 木下紀正・飯野直子・坂本昌弥・金柿主税 (2006) : 三宅島火山ガスの動態と防災体制. 科研費特定領域「火山爆発のダイナミクス」2005年度研究成果報告書, 406-414.
- 木下紀正・坂本昌弥 (2008) : 工場排煙・放射性物質と火山ガスの大気拡散問題. 日本科学者会議第17回総合学術研究集会予稿集, 216-217.
- Kinoshita, K. and Sakamoto, M. (2013) : Volcanic Islands Chain South of Kyushu, Japan. The Islands of Kagoshima. Kawai, K., Terada, R. and Kuwahara, S. (eds.). Kagoshima Univ. Res. Center for the Pacific Isls., Chap. 21, 128-135.
- Kinoshita, K., Sakamoto, M., Kanagaki, C., Iino, N. (2013) : Mechanism of high concentration events of sulfur dioxide at the surface around Sakurajima Volcano. IAVCEI 2013 Scientific Assembly Program, 1094.
- 霧島市教育委員会 (2012) : 霧島市防災教育モデル実践事業取組. 鹿児島県 HP. (最終閲覧日 ; 2014年3月14日) <http://www.pref.kagoshima.jp/>
- 木崎甲子郎編 (1985) : 『琉球弧の地質誌』. 沖縄タイムス社, 278pp. 沖縄.
- 気象庁 (2003) : 火山噴火予知連絡会による活火山の選定及び火山活動度による分類 (リンク分け) について. 報道発表資料, 7pp.

気象庁 (2013a) : 日々の天気図. 気象庁 HP. (最終閲覧日 : 2013 年 3 月 10 日).

<http://www.data.jma.go.jp/>

気象庁 (2013b) : 過去の気象観測データ. (最終閲覧日 : 2013 年 9 月 25 日).

<http://www.data.jma.go.jp/>

木庭元晴・中田 高・渡部佐知子 (1979) : 宝島・小宝島の第四紀後期離水サンゴ礁と完  
新世後期の海水準. 地球科学, **33**, 173-191.

小林 淳・奥野 充・中村俊夫 (1997) : 箱根古期外輪山西斜面に分布する中央火口丘起  
源の火砕流堆積物. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, **8**, 172-182.

Kobayashi, T., Aramaki, S., Watanabe, T. and Kamada, M. (1981) : Kirishima Volcano.

Symposium on arc volcanism Tokyo and Hakone, Japan. Field excursion guide to Sakurajima,  
Kirishima and Aso Volcanoes, Volcaol. Soc. Japan, 19-32.

国土庁防災局 (1992) : 火山噴火災害危険区域予測図作成指針. 202pp.

国土交通省 (2004) : 火山噴火への対応策 ―有珠山・三宅島の経験から―. 平成 14 年度  
～平成 15 年度政策レビュー結果 (評価書), 94pp.

国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所 (2007) : 桜島広域火山防災マップ.

小西健二 (1965) : 琉球列島 (南西諸島) の構造区分. 地質学雑誌, **71**, 437-457.

小坂丈予・平林順一・山本雅弘・野上健治 (1998) : わが国に於ける火山ガス人身災害の  
発生要因とその防止対策. 自然災害科学, **17**, 131-154.

越桐國雄 (2009) : 科学教育ポータルサイトの現状と課題. 大阪教育大学紀要, 第 V 部  
門, **57**, 151-161.

小藤文治郎 (1897) : 琉球弧島の地質. 地質学雑誌, **5**, 1-12.

小山田 恵 (2000) : 桜島噴煙の移流と火山ガスの研究. 鹿児島大学教育学部卒業論文.

小山田 恵 (2002) : 黄砂エアロゾルと三宅島噴煙の気象衛星データによる研究. 鹿児島  
大学大学院教育学研究科教科教育専攻理科教育専修, 修士論文.

- 小山田 恵・木下紀正 (2000) : 環境大気データによる黄砂と火山ガスの検出. 平成 11 年度日本気象学会九州支部講演会講演要旨集, 13-14.
- 久野 久 (1972) : 箱根火山地質図説明書, 久野 久原著「箱根火山地質図説明書」再版委員会, 大久保書店, 52pp. 東京.
- 町田 洋・新井房夫 (1992) : 『火山灰アトラスー日本列島その周辺』. 東京大学出版, 276pp. 東京.
- 町田 洋・太田陽子・河名俊男・森脇 広・長岡信治 (2007) : 日本の地形 7, 九州・南西諸島. 東京大学出版会, 355pp. 東京.
- Matsumoto, T. (1943) : The four gigantic caldera volcanoes of Kyushu. Japan. Jour. Geol. Geogr., **19**, 1-57.
- 松本征夫 (1979) : 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. 地質学論集, **16**, 127-139.
- 松本征夫 (1983) : 琉球列島における新生代火山活動. 地質学論集, **22**, 81-91.
- 松本幡郎・成重欽也 (1985) : 大分県国東半島の火山地質. 熊本大学教養部紀要 (自然科学編), **20**, 61-76.
- 南日本新聞 (2006), 7月19日朝刊.
- 三次徳二 (2008) : 小・中学校理科における地層の野外観察の実態. 地質学雑誌, **114**, 149-156.
- 三宅村 (2005) : 三宅村火山ガスに対する安全確保に関する条例施行規則.
- 宮下 治 (1999) : 地学野外学習の実施上の課題とその改善に向けて -東京都公立学校の実態調査から-. 地学教育, **52**, 63-71.
- 文部科学省 (2008) : 中学校学習指導要領解説, 理科編. 大日本図書, 80-85. 東京.
- 文部科学省 (2009) : 高等学校学習指導要領. 株式会社東山書房, 295pp. 京都.
- 文部省 (1999) : 高等学校学習指導要領解説, 理科編, 理数編. 大日本図書, 149-174. 東京.
- 守屋以智雄 (1978) : 空中写真による火山の地形判読. 火山 第2集, **23**, 199-214.

- 内閣府 (2003) : 三宅島火山ガスに関する検討会 報告書. 81pp. (最終閲覧日 ; 2014 年 3 月 15 日) <http://www.g-investor.com/>
- 内閣府 (防災担当)・消防庁・国土交通省・国土保全局砂防部・気象庁 (2013) : 火山防災マップ作成指針. 105pp.
- 中田節也・長井雅史・安田 敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001) : 三宅島 2000 年噴火の経緯—山頂陥没口と噴出物の特徴—. 地質学雑誌, **110**, 168-180, 2001.
- 中野 俊・下司信夫 (2008) : 鹿児島県トカラ列島, 小臥蛇島火山の概要. 地質調査研究報告, **59**, 197-201.
- 直江寛明・木下紀正・池辺伸一郎 (1993) : 九州における火山ガス長距離輸送の解析. 天気, **40**, 671-679.
- 成尾英仁・小林哲夫 (1983) : 鹿児島県指宿地域の火山活動史—阿多火砕流以降について. 地質学会第 90 年学術大会講演要旨集, 309.
- 成尾英仁・永山修一・下山覚 (1997) : 開聞岳の古墳時代噴火と平安時代噴火による災害—遺跡発掘と資料からの検討—. 月刊地球, **19**, 215-222.
- 西日本新聞 (2006) : 6 月 13 日朝刊.
- 小形昌徳 (1989) : 九州西北部, 多良岳地域の火山地質. 地質学雑誌, **95**, 755-768.
- 小形昌徳・高岡宣雄 (1991) : 多良岳地域の火山岩類の K-Ar 年代. 火山, **36**, 187-191.
- 岡本義男 (2003) : モデルを意識した地学教材, 特に地震分野, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会特別公開セッション講演要旨, 64-75.
- 奥野 充 (2002) : 南九州に分布する最近 3 万年間のテフラの年代学的研究. 第四紀研究, **41**, 225-236.
- 小野晃司 (1984) : 阿蘇火山 1 火砕流堆積物とカルデラ. アーバンクボタ, **22**, 42-45.
- 小野晃司・松本征夫・宮久三千年・寺岡易司・神戸信伸 (1977) : 竹田地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 156.

- 小野晃司・渡辺一徳 (1985) : 阿蘇火山地質図 1 : 50000. 火山地質図, 04, 地質調査所, 茨城.
- 小野晃司・渡辺一徳・星住英夫・鎌田浩毅・町田 洋 (1996) : 中部九州のテフロクロノロジー. 第 5 回第四紀学会テフラ研究委員会野外集会案内書, 62pp.
- 大和田道子・風早康平 (2005) : 火山ガス観測のための小型 SO<sub>2</sub> 観測システムの開発. GSI ニュースレター, 6, 1-3.
- 小山真人 (2006) : 地震・火山の教材開発と知識普及に関する最近の実践的取り組み. 消防防災, 15, 35-39.
- 小山真人 (2014) : 低頻度巨大災害のリスクを定量評価する —合理的な「想定外」対策に向けて. 科学, 84, 191-194.
- 小山真人・坂本珠紀 (2003) : 火山としての富士山に対する行政と住民の意識. (2002~03 年調査結果). 地質ニュース, 591, 19-23.
- 三枝恭代・早川由起夫 (2001) : 嬭恋村鎌原における天明 3 年 (1783 年) 浅間山噴火犠牲者供養の現状と住民の心理. 歴史地震, 17, 39-47.
- 酒井治孝 (2003) : 『地球学入門』. 東海大学出版会, 284pp. 神奈川.
- 坂本昌弥 (2006) : 理科教育における火山防災学習の必要性. 平成 18 年度全国理科教育大会・第 77 回日本理化学協会総会宮城大会論文集, 250-253.
- 坂本昌弥 (2007a) : 2002-2003 年度における桜島火山 SO<sub>2</sub> ガス濃度と防災教育の必要性. 理科部会誌, 鹿児島県高等学校教育研究会理科部会, 48, 59-72.
- 坂本昌弥 (2007b) : SiPSE を活用した火山防災教育. 平成 19 年度全国地学教育研究大会・日本地学教育学会第 61 回全国大会島根大会講演予稿集, 120-121.
- 坂本昌弥 (2007c) : 桜島火山防災教育の実践 —人工衛星画像と防災マップの活用—. 日本理科教育学会九州支部発表論文集, 35, 59-62.
- 坂本昌弥 (2007d) : 桜島火山に関する防災教育の現状と課題. 鹿児島県地学会誌, 93, 3-13.

- 坂本昌弥 (2010) : 高等学校教育における地学 I・II の選択者数の現状と今後の課題. 鹿児島県地学会誌, **96**, 13-18.
- 坂本昌弥 (2013) : 高校地学における近赤外衛星画像を活用した火山地形学習と防災教育. 地域政策科学研究, **10**, 25-48.
- 坂本昌弥・木下紀正 (2005) : 2001 年の桜島における火山ガス高濃度事象. 鹿児島大学教育学部研究紀要, 自然科学編, **56**, 11-20.
- 坂本昌弥・木下紀正 (2006) : 最近の桜島火山活動と火山防災マップを活用した防災教育. 日本火山学会講演予稿集 2006 年度秋季大会, 106.
- 坂本昌弥・木下紀正・八田明夫・森脇広 (2006) : 桜島火山防災マップを活用した防災教育, 第 34 回日本理科教育学会九州支部大会, 発表論文集, **34**, 17-20.
- Sakamoto, M., Kinoshita, K., Tomioka, N. and Togoshi, H. (2007) : School Education for Volcainc Disaster Mitigation using 3D Satellite Image Presentaion System SiPSE. Cities on Volcaoes 5 Conference, 32-P-17.
- 坂本昌弥・木下紀正 (2009) : 2001 年桜島火山ガスを教材とした気象教育. 平成 20 年度日本気象学会九州支部発表会要旨集, 5-6.
- 坂本昌弥・木下紀正 (2010) : 3D 衛星画像を教材とした高等学校地学教育. 平成 22 年度全国地学教育研究大会, 日本地学教育学会第 64 回全国大会鹿児島大会講演予稿集, 98-99.
- 坂本昌弥・木下紀正 (2014) : 桜島火山ガスの挙動と防災. 地域政策科学研究, **11**, 1-25.
- 桜井愛子 (2013) : わが国の防災教育に関する予備的考察—災害リスクマネジメントの視点から—. 国際協力論集, **20**, 147-169.
- 千田 昇 (1979) : 中部九州の新时期地殻変動—とくに第四紀火山岩分布地域における活断層について—. 岩手大学教育学部研究年報, **39**, 37-75.
- 嶋野岳人・小屋口剛博 (2001) : 諏訪之瀬島火山 1813 噴火 (文化噴火) の噴火様式とマグマの脱水過程. 火山, **46**, 53-70.

- Shinkura, R., Fujiyama, C. and Akiba, S. (1999) : Relationship between ambient sulfur dioxide levels and neonatal mortality near the Mt Sakurajima volcano in Japan. *J. Epidemiology* **9**, 344-349.
- 杉本智彦 (2002) ; カシミール 3D 入門 山と風景を楽しむ地図ナビゲータ. 株式会社実業之日本社, 144pp. 東京.
- 杉本伸一・長井大輔 (2009) : 雲仙火山 1991 年 6 月 3 日の火砕流による人的被害. 九大理研報 (地球惑星), **22**, 9-22.
- 数研出版株式会社 (2004) : 高等学校 地学 I 地球と宇宙, 272pp.
- 数研出版株式会社 (2010) : 改訂版高等学校地学 I, 地球と宇宙. 数研出版, 74-77.
- 田川義博 (2011) : 東日本大震災にみる情報セキュリティと企業行動. 情報セキュリティ総合科学, **3**, 68-90.
- 高柳慎一郎・早川由起夫 (2007) : おいしい火山実験. 群馬大学教育実践研究, **24**, 109-119.
- 田村糸子 (2008) : 高等学校における地学教育の現状と問題点. 地質学雑誌, **114**, 157-162.
- 戸越浩嗣・富岡乃夫也・木下紀正 (2000) : 数値標高モデルと衛星データを用いた教育用 3 次元動画像表示提供システムの構築. 鹿児島大学教育学部教育実践研究紀要, **10**, 85-92.
- 陶野郁雄 (1993) : 複合災害と総合的災害予測図. 第四紀研究, **32**, 28-41.
- 露木利貞 (1969) : 九州地方における温泉の地質学的研究 (第 5 報), 鹿児島地溝内の湧出する温泉, 特に温泉貯留体について. 鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学), **2**, 85-101.
- 宇井忠英 (1967) : 鹿児島県指宿地方の地質. 地質学雑誌, **73**, 477-490.
- 宇井忠英 (1997) : 火山噴火と災害. 東京大学出版会. 219pp.
- 矢部長克 (1926) : 第三紀及其直後に於ける九州地史の概要. 地理学評論, **2**, 1-16.

山崎 誠 (2004) : アジア大陸から移流した硫酸塩エアロゾルの煙霧による高 SPM 事例の  
解析. 福岡市保健環境研究所報, **29**, 101-104.

安井真也・高橋正樹・石原和弘・味喜大介 (2006) : 桜島火山大正噴火の記録. 日本大学  
文理学部自然科学研究所研究紀要, **41**, 75-107.