

# 産総研における空中物理探査の10年間(2000～2009) ー有珠から有珠へー

大熊 茂雄<sup>1)</sup>・中塚 正<sup>1)</sup>・駒澤 正夫<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

それは、突然始まりました。2000年3月下旬～4月上旬にイタリア・エオリア諸島のブルカノ島に重力調査に行っていた著者の一人(大熊)は、滞在中のアパートのテレビに映し出されるニュース映像に目を奪われました。住宅地の裏山から噴煙が上がる映像が繰り返し流されています(古川ほか, 2001)。イタリア語のニュース音声は内容が分かりませんが、どうやら日本の有珠火山が突然噴火を開始したようです。しかし、新たな噴火口は住宅街に近すぎます。住民の方は大丈夫でしょうか。ニュースでは、小淵首相の映像も流されています。調査終了後、帰国した私達を待っていたのは、小淵首相入院のニュースと有珠2000年噴火対応の多忙な生活でした。

## 2. 有珠火山及び岩手火山における空中物理探査

このようにして始まった有珠2000年噴火は、当初数多くの小噴火口を形成するなど非常に活発なもので、その推移評価が地元自治体の災害復興計画の策定にとって非常に重要となりました。しかし、活動中の噴火口への地上からのアクセスは安全上困難であり、我々は国の緊急調査事業の一環として、2回の空中物理探査を実施しました(大熊ほか, 2001)。1回目に行った2000年6月のヘリコプター空中磁気探査(第1図)によって、新たに形成された西山西麓火口群の北方付近を中心として顕著な低磁気異常が観測されました(大熊ほか, 2003)。当初、噴火活動と関連する熱異常が疑われましたが、その後の地質図との詳細な比較検討の結果などから、付近に一部露出する逆帯磁の新第三紀火山岩類(曾屋ほか, 2007)がその原



第1図 2000年6月の有珠火山地域高分解能空中磁気探査の際、大有珠付近を飛行中の探査ヘリコプター(中日本航空(株)所有)。機体下部に、磁力計センサーなどを収納したスティンガーが固定されています(撮影:2000年6月)。

因であると判断されました。

2回目に行った2000年10月の空中電磁・磁気探査の結果、調査時依然として噴気活動が盛んであった西山西麓火口群付近や、山頂火口内で顕著な低見掛比抵抗域が観測されました(大熊ほか, 2002)。また、有珠外輪山溶岩分布域では高見掛比抵抗が分布することが分かりました。このようななか、幸にも有珠火山の噴火活動は2000年の8月には峠を越え、翌年には終息宣言が出されました。

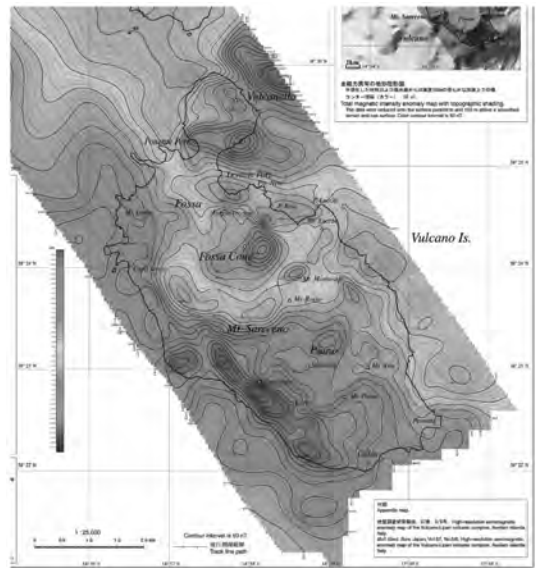
2000年11月には、当時火山活動が顕在化し噴火が危惧されていた岩手火山でも空中電磁・磁気探査を行いました(大熊ほか, 2008a; 第2図)。この結果、当時活発な噴気活動が認められた姥倉山～黒倉山の尾根筋に顕著な低見掛比抵抗域が分布することが分かりました。有珠火山でも同様に噴気地域で顕著な低

1) 産総研 地質情報研究部門

キーワード: 空中探査, 空中磁気, 空中電磁, 空中重力



第2図 2000年11月の岩手火山地域空中電磁・磁気探査の際、使用した探査ヘリコプター(東邦航空(株)所有)。機体下部に、磁気バード(上方)と電磁バード(下方)を曳航して、地磁気の強さと見掛比抵抗を測定します(撮影:2000年11月)。



第3図 イタリア・ブルカノーリパリ火山地域高分解能空中磁気異常図(Okuma *et al.* (2006b)を一部拡大)。ブルカノ島北部中央に位置するブルカノ火山フォッサ火砕丘の北部と北東部を中心とした地域で高磁気異常が認められます。

見掛比抵抗域が認められたことから、噴気地域の調査に空中電磁探査が有効であることが分かりました。また、見掛比抵抗分布や磁気異常分布から推定した変質地域の一部が、その後の地質調査を踏まえて編集された岩手火山地質図(伊藤・土井, 2005)でも強変質帯と記述されたことは記憶の新しいところです。岩手火山では、低磁気異常(極磁力異常)と低見掛比抵抗が変質帯の分布とよく一致することから、空中電磁探査が行えず見掛比抵抗データがない場合でも、磁気異常データのみから変質帯の推定が行える可能性を示唆しています(大熊ほか, 2008b)。

### 3. イタリア・エオリア諸島における空中磁気探査

産業技術総合研究所地球科学情報研究部門(現地情報研究部門)では、欧州のオーストリア地質調査所(GBA)と1990年代後半に研究協力を開始し、2001年に最初の(大熊・中塚, 2001)、そして2006年には2回目のCA(研究協力協定)を結んで、主にイタリア火

山での物理探査に係わる国際共同研究を実施してきました。

この間、イタリア・エオリア諸島ブルカノ島及びリパリ島における空中磁気探査、重力探査及び地質調査に係わる研究を実施しました。当該研究では、5万の1の高分解能空中磁気異常図(Okuma *et al.*, 2006b; 第3図)を編集し公表するとともに、特にブルカノ火山フォッサ火砕丘付近の磁気異常を解析して、当該地域の地下構造を推定しました。この結果、フォッサ火砕丘の北斜面の単なる水蒸気噴火による爆裂火口と考えられていたForgia Vecchia(第4図)の地下に、貫入岩体を示唆する高磁性岩体が伏在することが分かりました。また、フォッサ火砕丘の北東部においても高磁性岩体が伏在することが明らかとなり、火砕物に覆われたかつての噴火中心の存在が推定されました(Okuma *et al.*, 2006a)。その後、GBAによって行われた地上電気探査の結果、これら高磁性岩体の伏在域には高比抵抗岩体が分布することが分かり、磁気異常の解析結果を支持しています。

また、ストロンボリ式噴火の模式地として知られ、今も周期的に噴火を繰り返すエオリア諸島ストロンボ



第4図 イタリア・ブルカノ島のForgia Vecchia火口(写真中央の崩壊地形)。手前はレバンテ港でブルカノ観光の玄関口。(撮影：2002年11月)。



第5図 Sciara del Fuoco. イタリア・ストロンボリ火山の山頂火口から北西側に開けた火山性の崩壊地。山体崩壊で形成されたと考えられています。山頂部付近では活発な噴気が見られました。(撮影：2002年11月)。

り火山(第5図)においても空中磁気探査を実施し、文科省の外国人研究者招へい事業によりGBAから研究者を招いて共同研究を実施しました。GBAが独自にストロンボリ火山において追加調査して観測した空中磁気データも併せて編集し、磁気異常の解析を行いました。その結果、ストロンボリ火山中央部に位置する現在活動中の山頂火口付近を中心として、顕著な低磁化強度域が分布し、当該現象はマグマの熱や熱水活動による山体構成岩石の消磁によるものと解釈されました(Okuma *et al.*, 2009)。また、付近の海底下に位置する海山とその周辺部では高磁化強度域が分布し、海底火山とそこから噴出した溶岩分布に対応する可能性が示唆されました。

ストロンボリ火山での磁気異常の解析の結果、大局的な地質・地質構造や噴火活動に係わる熱異常について興味ある情報が得られましたが、既往の空中磁気探査データは測線間隔が0.75kmと粗く、より詳細な地質・地下構造調査のためには不十分なため、測線間隔が100～200m程度の高密度の高分解能空中磁気探査が必要となります。高分解能調査を行うため、様々な機会を通じてアピールを行っています。残念ながら現在のところ実現には至っていません。しかし、噴火活動を行う火道の位置などが磁気異常の解析の結果から推定できる可能性もあり、火山学的に興味ある課題解明のため、なんとか実現したいと考えています。

#### 4. 富士火山における空中磁気探査

火山災害としては、噴火災害もさることながら、急峻な山体では大地震等により山体崩壊が発生し、遠方まで岩屑なだれが流下し流域に大被害を与えることがあることが知られています。一方、山体崩壊や斜面崩壊も至るところで発生するわけではなく、発生し易い場所があると考えられています。その指標の一つとして、地表及び地下構成岩石の種類やその構造及び構成岩石の変質の程度等が挙げられます。地下構造調査のためには、通常物理探査が行われますが、急峻な火山体では、地表調査が容易でないため、空中探査の出番となります。そこで、筆者らは、2節で述べたように岩手火山をモデル火山として山体安定性評価のために空中物理探査を実施し、地質・地下構造調査を実施しました。その結果、空中物理探査による火山体の変質域調査の有効性が確認できましたので、次の調査対象火山として、そして究極の対象として富士火山を選びました。

御存知のように、富士火山は標高3,776mと日本の最高峰であるとともに、流麗かつ急峻な山体で知られています。その美しい山容とは相反して、単一の山体でなく、小御岳、古富士及び新富士の複数の火山体からなっています(津屋, 1968)。最近では、さらに別個の火山体「先小御岳」も発見されています(中田ほか, 2007)。また、山体崩壊も複数発生したことが知ら



第6図 2003年の富士火山地域高分解能空中磁気探査の際、宝永第一火口上空を飛行する探査ヘリコプター(中日本航空(株)所有)。

れています(例えば、荒牧・大田(2008))。

富士火山では、標高が高く急峻なため気象条件も厳しく、上空の飛行自体も容易ではないため、検討の結果、空中電磁探査のように電磁バードをヘリコプターからつり下げる方式の調査飛行は実施できないことが分かりました。そこで、磁力計センサーを機体に固定したスティンガーとよばれる突起部に収納して調査を行う、いわゆるスティンガー方式のヘリボーン空中磁気探査システムを新たに構築し、2003年に山頂火口を中心とした地域の調査を実施しました(大熊ほか、2004)。5月下旬から調査を開始しましたが、あいにくの天候不順ですぐに梅雨入りとなり、一時中断の後、8月下旬に再開し9月下旬に終了しました。最後に残った調査地域は、富士火山の南東斜面で、植生が少ないため、日昇とともに雲が発生することが多く、宝永火口(第6図)はあっという間に雲に包まれてしまいます。著者の一人(大熊)は、調査中、毎日早朝起床し富士宮市の宿泊先から富士宮口5合目まで車を飛ばし、現地の天候を調査クルーに連絡することを日課にしていました。

富士火山の空中磁気探査の結果、その東側斜面において、予期しない、顕著な東西性の正負一対の磁気異常(全磁力異常)が認められました(大熊ほか、2004)。その後2007年に行った2003年調査域東方の追加調査も含めて詳細に検討した結果、当該の磁気異常は、富士火山の東側斜面の須走口登山道の5号目より高い地域に分布し、その東側には連続しない



第7図 2008年10月の能登半島北部沿岸域重力探査に使用した探査ヘリコプター(朝日航洋(株)所有；撮影2008年10月)。機体内部に空中重力計、光ファイバージャイロ、GPS受信機及びデータ収録装置などの測定機器が収納されています。

ことが確認できました(大熊ほか、2008c)。当該地域では、御殿場岩屑なだれを発生させた山体崩壊の発生箇所が疑われていますが、当該の高磁気異常は崩壊地の構造に規制されて分布する高磁化強度の火山岩の分布を示すものと考えられ、現在地上電磁探査による検証調査(大熊ほか、2009)を実施中です。

## 5. 能登半島北部沿岸域における空中重力探査

空中重力探査というと、10年程前までは、我々も含めてかなり懐疑的な人が多かったと記憶しています。加速度の大きい航空機を使って、重力(重力加速度)を本当に測れるのだろうかと多くの人が思っていました。これが実現できるようになったのは、GPSによって機体の位置(速度、加速度)計測が高精度に行われるようになったからです。日本では、1990年代後半から、現東京海洋大学の瀬川氏によってヘリコプターを用いた「空中重力探査システム」が開発され、近年実用化に至っています(瀬川ほか、2002)。

産総研では、2008年度より政策課題として、「沿岸域の地質・活断層調査」と題するプロジェクトを開始しました。これは、前年の2007年に、能登半島地震と新潟県中越沖地震が、沿岸部の地球科学的調査未実施の地域で発生し、沿岸部の地質構造調査の必要性が考慮されたためです。基盤構造や断層構造調査に威力を発揮する重力データについても、沿岸域は船上重力と陸上重力データの境界の空白域となってお

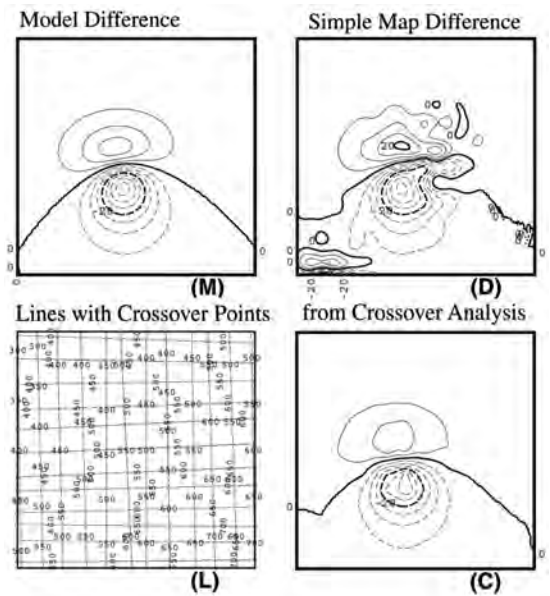
り、陸海域のデータの接合が必要です。

そこで、産総研では2008年に能登半島北部沿岸域をテストフィールドとして瀬川方式のヘリコプター(第7図)を用いた空中重力探査を実施しました。また、能登半島北部沿岸域の空中重力探査に併行して、海底重力調査も実施され、陸上重力及び船上重力データも含めて、総合に比較することができました(Komazawa *et al.*, 2010)。その結果、船上重力と陸上重力データを接合して得られる重力図と比肩する重力図が空中重力探査からも得られることが確認できたのに加えて、わずか3日間で調査できるその迅速性も体験できました。残念なのは、対象である地表から離れて空中で計測するため、いわゆる上方接続効果により、地表で観測するより信号が若干減衰してしまうことです。これを克服するには、重力センサーを複数配置した傾度測定などが考えられますが、より高度な技術が必要となり、今後の課題です。

## 6. そして再び有珠火山へ-空中における地磁気時空間変化の検出と火山活動の推移評価-

2節で述べたように、有珠火山では、2000年噴火に際し、高分解能空中磁気探査を実施して、滑らかな観測高度面上での精緻な磁気異常図を作成することができました。また、磁気異常の3次元解析を行い、伏在する有珠外輪山溶岩や逆帯磁の新第三紀火山岩類の分布を明らかにするとともに、西山西麓火口群が正帯磁の有珠外輪山溶岩と逆帯磁の新第三紀火山岩類との境界域に形成されたことを示しました(大熊ほか, 2010)。しかしながら、2000年噴火をもたらした地下浅部に貫入定置したはずのマグマそのものは、その位置・規模ともに明らかにできませんでした。これは、前述のように、マグマが正帯磁層と逆帯磁層との境界域に貫入したため、相対的に周囲の岩石が顕著な磁気異常変化を示さず、また調査時に貫入マグマが磁化を獲得するまで十分冷却していなかったためと考えられます。

一方、当該地域の地上定点での繰り返し磁気測定からは、時間変化量が50nT以上にもおよぶ地点があることが判明し、冷却中のマグマに起因するものと解釈されました(例えば、Hashimoto *et al.* (2008))。この磁気変化量は対地100～150m程度の空中でも十分検出可能な量で、空中磁気探査によれば地磁気時



第8図 拡張交点コントロール法(Nakatsuka and Okuma, 2006a)による効率的な地磁気時空間変化抽出法の模式図。測線を比較すべき調査の方向と直交方向にとる(L)ことにより、単なる2調査の差し引き(D)に比べ、モデルの時空間変化(M)の分布をよく再現しています(C)。

間変化の空間分布(時空間変化)を測定することができ、貫入マグマの位置や構造をより詳細に推定できます。しかしながら、地上定点での測定とは異なり、空中で既存の測線と全く同一の測線上で測定を行うことは事実上不可能です。そこで、このような点を考慮し、かつ効率的に地磁気の時空間変化を抽出する方法として拡張交点コントロール法(第8図)を開発しました(Nakatsuka and Okuma, 2006a)。この手法を浅間火山の2004年噴火前後の空中磁気異常データについて適用し、地質学的に意味のある地磁気変化の検出に成功しています(Nakatsuka *et al.*, 2009)。

そこで、噴火予知計画関連プロジェクト予算により、北海道大学が中核となって産総研も協力して、2010年秋に有珠火山で繰り返し空中磁気探査を行うことになりました。本調査により、2000年噴火地域にとどまらず、有珠火山本体や昭和新山で冷却中のマグマに起因する地磁気時空間変化の抽出が期待されています。

## 7. おわりに

産総研における最近10年間の空中物理探査に関する研究調査活動について、簡単に述べてきました。この10年間は長いようであつたという間でした。空中磁気探査については、ヘリコプターにより3次元的に取得された測定データから、任意の曲面へのデータの引き直し(リダクション)法(Nakatsuka and Okuma, 2006b)の開発、効率的な地磁気の時空間変化抽出手法(拡張交点コントロール法)の開発、3次元インバージョン手法の開発(中塚・大熊, 2010)などがなされてきました。国内外の火山で空中磁気探査を実施し、これらの技術を使って、データ処理、磁気図の編集及び磁気異常の解析を行い、興味ある結果を得ることができました。開発した技術は、アカデミアにとどまらず、最近では土木コンサルタント業界でも使われるようになったと聞いています。有珠火山と岩手火山においては、空中電磁探査も実施でき、その効用と限界も体験することができました。能登半島では、沿岸域の地質・活断層調査のため、ヘリコプターを用いた空中重力探査も実施できました。

最後に今後の空中探査を展望すると、空中探査は航空機の運航費に起因する高コスト体質を改善することにより、さらに発展する機会があると思われます。そのための方法の一つとして、無人航空機による調査の取り組みが考えられ、実際に既に営業活動を行っている企業や火山などの調査に利用している大学があります。無人航空機利用の場合、機体に取り付けられる機材の重量(ペイロード)に厳しい制限がある場合が多く、それに見合った日本初の新たなセンサー開発が今後望まれるでしょう。このためには、空中探査の実施者のみではなく、航空業界や電子技術業界などの関係者も交えたアライアンスの構築が必要となります。今後、広い分野の関係者の集合を期待します。

### 参 考 文 献

- 荒牧重雄・大田光代(2008):日本一の火山 富士山, 山梨県環境科学研究所, 94p.  
 古川竜太・中野 俊・大熊茂雄・杉原光彦(2001):クラテールを訪ねて—イタリア・ブルカノ火山の地質調査—. 地質ニュース, no.559, 32-40.  
 Hashimoto, T., Hurst, T., Suzuki, A., Mogi, T., Yamaya, Y. and Tamura, M. (2008): The role of thermal viscous remanent magnetisation(TVRM) in magnetic changes associated with volcanic

- eruptions: Insights from the 2000 eruption of Mt Usu, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **176**, 610-616.  
 伊藤順一・土井宣夫(2005):岩手火山地質図. 火山地質図, 13, 地質調査総合センター.  
 Komazawa, M., Okuma, S. and Segawa, J. (2010): An integrated airborne gravity survey of an offshore area near the northern Noto Peninsula, Japan. *Exploration Geophysics*, **41**, 1, 88-95; *Butsuri-Tansa*, **63**, 88-95; *Jigu-Mulli-wa-Tansa*, **13**, 88-95.  
 中田節也・吉本充宏・藤井敏嗣(2007):先富士火山群. 富士火山, 荒牧重雄, 藤井敏嗣, 宮地直道編集, 山梨県環境科学研究所, 69-77.  
 Nakatsuka, T. and Okuma, S. (2006a): Crossover analysis for the aeromagnetic survey at varying elevations, and its application to extracting temporal magnetic anomaly change, *Butsuri-Tansa (Geophys. Explor.)*, **59**, 449-458.  
 Nakatsuka, T. and Okuma, S. (2006b): Reduction of geomagnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations, *Exploration Geophysics*, **37**, 121-128.  
 中塚 正・大熊茂雄(2010):空中磁気データによる3次元地下構造イメージング:ソース体積最小化拘束の導入. 日本地球惑星科学連合2010年大会予稿集(CD-ROM).  
 Nakatsuka, T., Utsugi, M., Okuma, S., Tanaka, Y. and Hashimoto, T. (2009): Detection of aeromagnetic anomaly change associated with volcanic activity: An application of the generalized mis-tie control method, *Tectonophysics*, **478**, 3-18.  
 大熊茂雄・中塚 正(2001):オーストラリア地質調査所との研究協力—イタリア火山での物理探査. 地質ニュース, no.599, 20-24.  
 大熊茂雄・中塚 正・森尻理恵・牧野雅彦・内田利弘・小川康雄・高倉伸一・松島喜雄(2001):有珠火山地域における高分解能空中磁気探査(序報). 地調研報, 52, 149-154.  
 大熊茂雄・中塚 正・高倉伸一・森尻理恵(2002):有珠火山地域における空中電磁・磁気探査—有珠2000年噴火に対応して—. 火山, 47, 533-546.  
 大熊茂雄・中塚 正・森尻理恵・牧野雅彦(2003):有珠火山地域高分解能空中磁気異常図. 空中磁気図 41, 地質調査総合センター.  
 大熊茂雄・中塚 正・中野 俊・佐藤秀幸(2004):富士火山における高分解能空中磁気探査. 物理探査学会第110回学術講演会講演論文集, 336-339.  
 大熊茂雄・中塚 正・森尻理恵・高倉伸一(2008a):岩手火山地域高分解能空中磁気異常図. 空中磁気図 44, 地質調査総合センター.  
 大熊茂雄・中塚 正・森尻理恵・高倉伸一(2008b):空中物理探査データから推定される岩手火山の浅部地下構造. 第119回学術講演会講演論文集, 125-128.  
 大熊茂雄・中塚 正・大久保綾子・中野 俊(2008c):富士火山東部地域における高分解能空中磁気探査. 日本地球惑星科学連合2008年大会予稿集(CD-ROM).  
 大熊茂雄・高倉伸一・松島喜雄・中野 俊(2009):富士火山東部地域におけるAMT法電磁探査による地下構造調査(序報). Conductivity Anomaly研究会2009年論文集, 52-55.  
 大熊茂雄・中塚 正・石塚吉浩(2010):高分解能空中磁気探査で分かること, 分らないこと—有珠火山を例として. 日本地球惑星科学連合2010年大会予稿集(CD-ROM).  
 Okuma, S., Nakatsuka, T., Komazawa, M., Sugihara, M., Nakano, S., Furukawa, R. and Supper, R. (2006a): Shallow subsurface structure of the Vulcano-Lipari volcanic complex, Italy constrained by

- helicopter-borne aeromagnetic surveys, *Exploration Geophysics*, **37**, 129-138.
- Okuma, S., Nakatsuka, T., Supper, R. and Komazawa, M. (2006b) : High-resolution aeromagnetic anomaly map of the Vulcano-Lipari volcanic complex, Aeolian Islands, Italy, *Bull. Geol. Surv. Japan*, **57**, 177-190.
- Okuma, S., Stotter, C., Supper, R., Nakatsuka, T., Furukawa, R. and Motschka, K. (2009) : Aeromagnetic constraints on the sub-surface structure of Stromboli Volcano, Aeolian Islands, Italy. *Tectonophysics*, **478**, 19-33.
- 瀬川 滋朗・E.J.ジョセフ・楠本成寿・石原丈実・駒澤正夫・長谷川博・関崎征一・高田和典・中山英二・里村幹夫・佐久間貞臣 (2002) : ヘリコプター重力測定-開発研究(1998～2000)のまとめ. 東海大学海洋研究所研究報告, **23**, 1-16.
- 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・堺 幾久子・東宮昭彦(2007) : 有珠火山地質図(第2版). 火山地質図, 2, 地質調査総合センター.
- 津屋弘達(1968) : 富士火山地質図. 特殊地質図, No.12, 地質調査所.
- 
- OKUMA Shigeo, NAKATSUKA Tadashi and KOMAZAWA Masao (2011) : Ten-year history (1999-2000) of airborne geophysical surveys at the Geological Survey of Japan, AIST - from Usu to Usu.
- 

< 受付 : 2010年8月2日 >