

1888年小磐梯崩壊前後の地形図から求めた差分量

Estimation of Collapse Volume Using Topographic Maps
Compiled before and after the Kobandai Collapse in 1888

地理調査部 水越 博子・村上 広史・星野 実

Geographic Department

Hiroko MIZUKOSHI, Hiroshi MURAKAMI, Minoru HOSHINO

要旨

1888年に磐梯火山で起きた小磐梯崩壊の崩壊量として、これまでSekiya and Kikuchi (1890) により求められた 1.21km^3 という値が知られている。

しかし、1889年に農商務省地質局（現在の地質調査所の前身）により作成された1:50,000災害地形図「磐梯山之図」（米地, 1992）を数値化し（水越ほか, 1994）、陸地測量部により1926年に発行された1:50,000地形図「磐梯山」から作成した数値データとの差分をとって小磐梯崩壊前後の高度差分量を算出したところ、 $0.14 \pm 0.11\text{km}^3$ という値を得た。この値はSekiya and Kikuchi (1890) が算出した値より一桁少ないが、セン

トヘレンズ火山災害の研究結果と比較しても整合している（水越・村上, 1997）。

本報告は、「磐梯山之図」の数値化から、小磐梯崩壊前後の高度差分量の算出までの過程で得られた成果に加え、その作業過程において得られた知見をまとめたものである。

1. はじめに

1888年7月15日、磐梯火山では小磐梯の崩壊により岩屑なだれが発生し、死者461名・負傷者70名を出す大惨事となった。岩屑なだれ災害として日本では他に浅間（1783）、雲仙眉山（1792）、御嶽山（1984）等でも起き

表-1 磐梯火山の変動と数値化した地形図

年代	磐梯火山活動関連	地形図関連・その他
1888年	小磐梯崩壊	
1889年		農商務省地質局にて「磐梯山之図」印刷 (本文中では1889年図と呼ぶ。表現されている地形は小磐梯崩壊以前のものである。)
1892年		陸地測量部にて全国1/50,000地形図（経度差 $15'$ ×緯度差 $10'$ 、多面体図法、平板測量）作成開始
1897年	鳴動	
1912年		陸地測量部にて1/50,000地形図「磐梯山」発行
1918年		標準経度 $+10''.4$ の誤差修正
1926年		陸地測量部にて1/50,000地形図「磐梯山」発行 (本文中では1926年図と呼ぶ。表現されている地形は1908年のものである。)
1938年	山崩れ 崩壊量 0.0011km^3 (飯田汲事, 1938)	
1954年	山崩れ, 地震群発 崩壊量 0.015km^3 (佐藤留太郎, 1956)	
1960年		地形図の投影法が多面体図法からUTM図法に変更
1992年		「磐梯山之図」公表 (米地, 1992)
1993年		1/50,000地形図「磐梯山」発行 (但し, 1/50,000地形図「磐梯山」の資料となった1/25,000地形図「磐梯山」・「中沢」・「猪苗代」・「関都」の図化に使用された空中写真は1988年に撮影された。)

表-2 陸地測量部～国土地理院が発行した1:50,000地形図「磐梯山」

図歴	発行年月日
明41 測図	大1年11月30日
	大2年5月30日
大14 鉄補	大15年7月30日
昭6 要修	昭8年5月30日
	昭21年11月30日
	昭22年3月30日
昭23 資修	昭23年5月30日
	昭23年7月30日
昭27 応修	昭28年4月30日
	昭30年8月30日
	昭33年10月30日
昭35 修正	昭39年7月30日
昭43 資修	昭44年3月30日
昭48 編集	昭50年2月28日
平3 修正	平5年3月1日

ているが、1980年にアメリカのセント・ヘレンズ火山でも同種の現象が起きたことから、これらの火山災害、特にその発生機構について世界的に関心が高まり、日本でも1990年から1994年にかけて科学技術振興調整費による「火山地域における土砂災害予測手法の開発に関する国際共同研究」として、防災科学技術研究所を中心に磐梯火山をモデルとした岩屑なだれ災害に関する共同研究が行われた。

小磐梯の崩壊は、馬蹄形カルデラの形成を始め、流れ山を伴う堆積地形の形成、長瀬川のせき止めによる松原湖・小野川湖・秋元湖の形成等、様々な地形的变化を生じさせた。この小磐梯崩壊という地変の規模を定量的に把握し、その崩壊量を精度よく算出することは重要な課題の一つである。

これまで知られていた崩壊量としては、Sekiya and Kikuchi (1890) により求められた1.21km³という値がよく引用されている。これ以外にも、崩壊当日の写真やスケッチ等から小磐梯崩壊前の地形を復元・数値化するという作業により、0.492km³という崩壊量が算出されている(米地ほか, 1988; 米地・千葉, 1989)。しかし、小磐梯崩壊前の地形を記した地形図としては、これまでスケッチや略図程度のものしか見つかっていなかったため、復元の際に推定に頼る部分が多く、その復元結果の精度の算出は困難であった。

米地 (1992) が明治中期 (1889年) に農商務省地質局

(現在の地質調査所の前身) により作成された1:50,000災害地形図「磐梯山之図」(以下、1889年図という) を公表した。この1889年図が小磐梯崩壊前の正確な地形を表すなら、1888年小磐梯崩壊現象に関する研究にとって貴重な資料となることから、水越ほか (1994) がその数値化及び解析を行った。しかし、1889年図の等高線を1993年図の等高線と比較すると場所により様々に等高線が歪んでいたため、そのまま高度差分量の算出に使用することは困難であった。そこで、水越・村上 (1997) は1889年図の等高線データに多項式変換を施して、歪みの補正を試み、さらに小磐梯崩壊後の地形図も数値化し、その差から小磐梯崩壊前後の高度差分量を算出した。

本報告は、1889年図の数値化から、小磐梯崩壊前後の高度差分量の算出までの過程で得られた成果に加え、その作業過程において得られた知見をまとめたものである。

2. 磐梯火山の崩壊の変遷と地図の関係

1888年の小磐梯崩壊から今日までに磐梯火山で起きた主な変動と本報告で使用した地図の関係を表-1にまとめた。

小磐梯崩壊前後の高度差分量を求めるには崩壊前後の地形図を数値化する必要がある。崩壊前の地形図としては1889年図のみであるが、崩壊後の地形図としては、明治41年から現在まで複数発行されている(表-2)。測量精度は新しい地形図の方が正確と考えられるが、磐梯火山では、1954年の湯桁山崩壊に見られるように、小磐梯崩壊によって生じた崩壊壁が1888年以降もしばしば崩れている。1926年発行及び1933年発行の1:50,000地形図「磐梯山」を比べると、既に湯桁山の山頂部の崩壊が進んでいるように描かれている(図-1)。したがって、小磐梯崩壊前後での高度差分量を求めるために数値化する崩壊後の地形図としては、小磐梯崩壊後の出来る限り早い時期に作られた地形図が望ましい。しかし、1918年の標準経度修正に見られるように、陸地測量部による測量開始後も、地図の仕様(図式)変更が行われてきている。本報告では、崩壊後の地形を表す地図としては、標準経度修正後に陸地測量部により作成された1:50,000地形図の中で最も古い、1926年発行の1:50,000地形図「磐梯山」(以下、1926年図という) を数値化した。

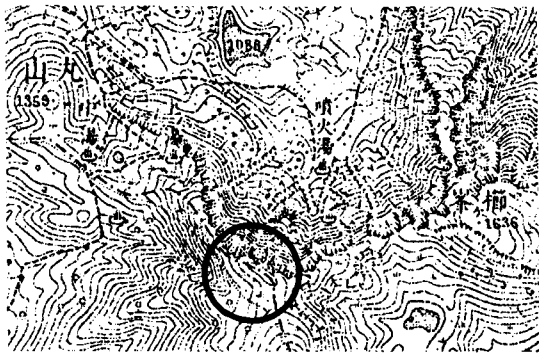
また、1889年図及び1926年図の検証に使うデータとして、1993年発行の1:50,000地形図「磐梯山」(以下、1993年図という) を用いた。

本報告での作業の流れを図-2に示す。

3. 1889年図の数値化

まず、1889年図をスキャナーで読み込み、600DPI・グレースケールのラスターデータに変換した。このラスターデータからベクター変換システムVTRAKで等高線を抽出し、ベクター化を行った。但し、崩壊が起きた

1926年発行 1:50,000地形図「磐梯山」



1933年発行 1:50,000地形図「磐梯山」



図-1 湯桁山山頂部の状況

中心部は「噴火」部分として濃く着色されているため画面上では等高線が判別できなかった。そこで、「噴火」部分の等高線については、原稿図からトレースしたものを数値化した。中心部のトレースは、正確を期するため、2回に分けて行った。

1889年図には等高線間隔以外の標高に関する情報が記されていない。そこで、1993年図の等高線と比較し、猪苗代湖北岸を通る標高520mの等高線を基準として標高を付与し、ベクター化を行った（水越ほか，1994）。完成した等高線のベクターデータをARC INFOに移入し、ラインカバレッジ→TIN（不定形三角形モデル）→LATTICE（グリッドデータ）の順に変換し、DEMを作成した（以下，1889年DEMという）。1889年DEMより作成した傾斜図では（以下，1889年傾斜図と呼ぶ。），山頂に近づくにつれ傾斜（ θ ）が急激に険しくなるという特徴がみられる（口絵1。白い部分は傾斜 $\theta = 0^\circ$ ）。

4. 1889年図の補正

1889年図作成のために行われた平板測量は、平面位置の測量と高低測量とを分けて行うため、平面位置と標高では、その誤差の傾向や大きさが異なると考えられる。そこで、等高線データの変換は、水平成分（x, y）と標高成分（z）に分けて行った。

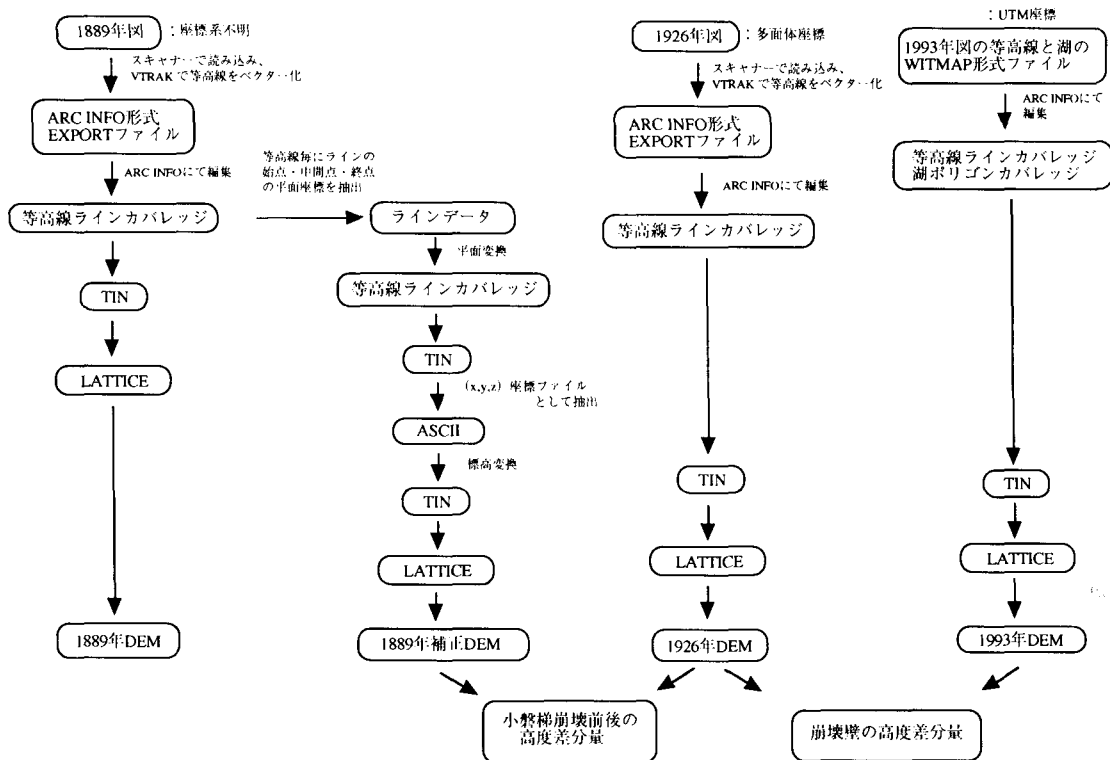


図-2 数値化及び補正の作業工程

4.1 平面座標の補正

1993年図は東京測地系のもとでUTM座標系に投影されたものだが、1889年図の作成にどのような測地系や地図投影法が使用されたのかは不明である。本報告では、1889年図には、図郭の左下隅を原点(0, 0)とする直角座標系を設定し、1993年図のUTM座標へ多項式変換を施すことにより、平面座標の補正を行った。n次の多項式変換式は次のように表される。

$$u = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j a_{ij} \cdot x^i \cdot y^{(j-i)}$$

$$v = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j b_{ij} \cdot x^i \cdot y^{(j-i)}$$

ここで(x, y)は1889年図上の平面座標であり、(u, v)は1993年図上の平面座標(UTM座標)である。a_{ij}, b_{ij}は変換係数である。

平面変換の手順としては、まず、1889年図と1993年図を比較して、主に山頂や道路の交差点等の対応の明らかな点(以下、対応点という。)を76点選び、ディジタルでその位置を計測する(図-3)。次に誤差の傾向をつかむために、これらの対応点に一次の多項式変換式を適用させて、最小二乗法により変換係数を決定する。このとき、1993年図の対応点の位置を真位置とした。こうして決定した変換係数によって、1889年図の対応点座標に1次の多項式変換を施した後の対応点位置と1993年図の対応点の位置の関係を図-4に示す。可能ならば、変換前の1889年図と1993年図の対応点の位置を比較したかったが、1889年図の座標系が不明のため、直接比較することはできなかった。

図-4の特徴としては、次の二点が挙げられる。第一は、人工物(主に道路の交差点)の対応点の平面誤差(この場合、変換後の1889年図上の対応点と1993年図上での同じ対応点との平面距離)が、山頂等の地形の対応点の平面誤差と比べて非常に小さいということである。人工物だけの対応点から算出した平面誤差の標準偏差(以下、平面標準偏差という)は、地形だけの平面標準偏差の半分以下である。このことから、この1889年図作成の際に、道路に沿って測量が行われた可能性が高いと考えられる。第二は、1889年図の北部の平面誤差が他と比べて大きいことである。磐梯火山の北側には道も集落も描かれていないことから、実際に測量が行われなかった可能性もある。

これらの特徴を踏まえて、平面変換に使用する対応点を選出する。図-3の対応点の中の、平面誤差が異常に大きい点のうち、変換次数を上げても誤差が小さくならない点は、異常点として除く。この結果、磐梯山の北部を中心とした19点が除かれ、残った対応点は57点になった。当初、崩壊量と堆積量及び、その収支を計算する予定であったが、堆積域にあたる磐梯山北部の平面誤差が大きく、この地域のデータは計算には使えないと判断したことから、堆積量の算出は中止した。

前述の57点の対応点を使用して、順次、次数を上げながら多項式変換を施したときの、対応点の平面標準偏差の変化を見ると、4次及び6次の点を変曲点とする曲線を描いている(図-5)。次数が1~3次のときに平面標準偏差が急激に下がるのはこのデータに含まれる1~3次の歪みが順次取り除かれているためであり、4~6次のときに平面標準偏差の変化が緩やかになるのは除去可能な歪みが大方取り除かれたため、また、7次以降で再び急激に下がるのは、係数の数に対応点から得られる既知数が近づいたことによる異常な動きであると考えられる。したがって、4~6次の次数が平面変換の次数として適切と判断できる。

1889年図から読みとった等高線ラインカバレッジ(図-6)から、等高線のライン毎に始点・中間点・終点の平面座標を抽出したラインデータに、上述の57点の対応点を用いて最小二乗法により決定した4~6次の三通りの係数を使用して多項式変換を施し、再び元のラインカバレッジに戻す。これで標高は不変のまま、平面座標のみを変換した等高線ラインカバレッジができる。

平面変換の結果を検討するために、崩壊域に隣接する櫛ヶ峰・湯桁山の山頂位置を調べる。その結果、6次平面変換を施した地形データでは、1888年には崩れていない櫛ヶ峰と湯桁山の山頂が1888年の崩壊域内に位置しているため、このデータを用いて小磐梯崩壊前後高度差分を算出するには問題があることから、平面変換の次数は、5次以下に限定される。また、図-5を見る限り、多項式変換で取り除くことの出来る平面誤差は、4次でおおよそ取り除けたと判断できるので、平面変換次数は4次とする。平面変換後の対応点の平面誤差を図-7に、平面変換後の等高線を図-8に示す。

4.2 標高値の補正

3で述べたように1889年図には等高線間隔以外の標高に関する情報が記されていない。また、山頂に近づくにつれ傾斜が急激に険しくなるという特徴をみると(口絵3)、標高についても2次以上の歪みがあると考えられる。

平面変換後の等高線ベクターデータに標高変換を施すための対応点を選択する。平面変換に使用した対応点は山頂と道路交差点が主であったが、道路交差点は標高が不明のものが多く、標高変換に使用できるものは少なかった。また、山頂の標高については、基準点の標高ではなく、対応点近傍の等高線の値を使用する。理由は、1889年図には前述のように標高値が記載されていないため、等高線どうしの標高を対応させるのが適当だと判断したからである。平面変換で選択した対応点57点のうち、標高不明の地物点及び標高誤差(3で1889年図に設定した標高と1993年図の標高の、同じ対応点での標高差)が200m以上の点は除いたため、対応点は39点になった。このとき、標高誤差が200m以上の対応点のほとんどは、

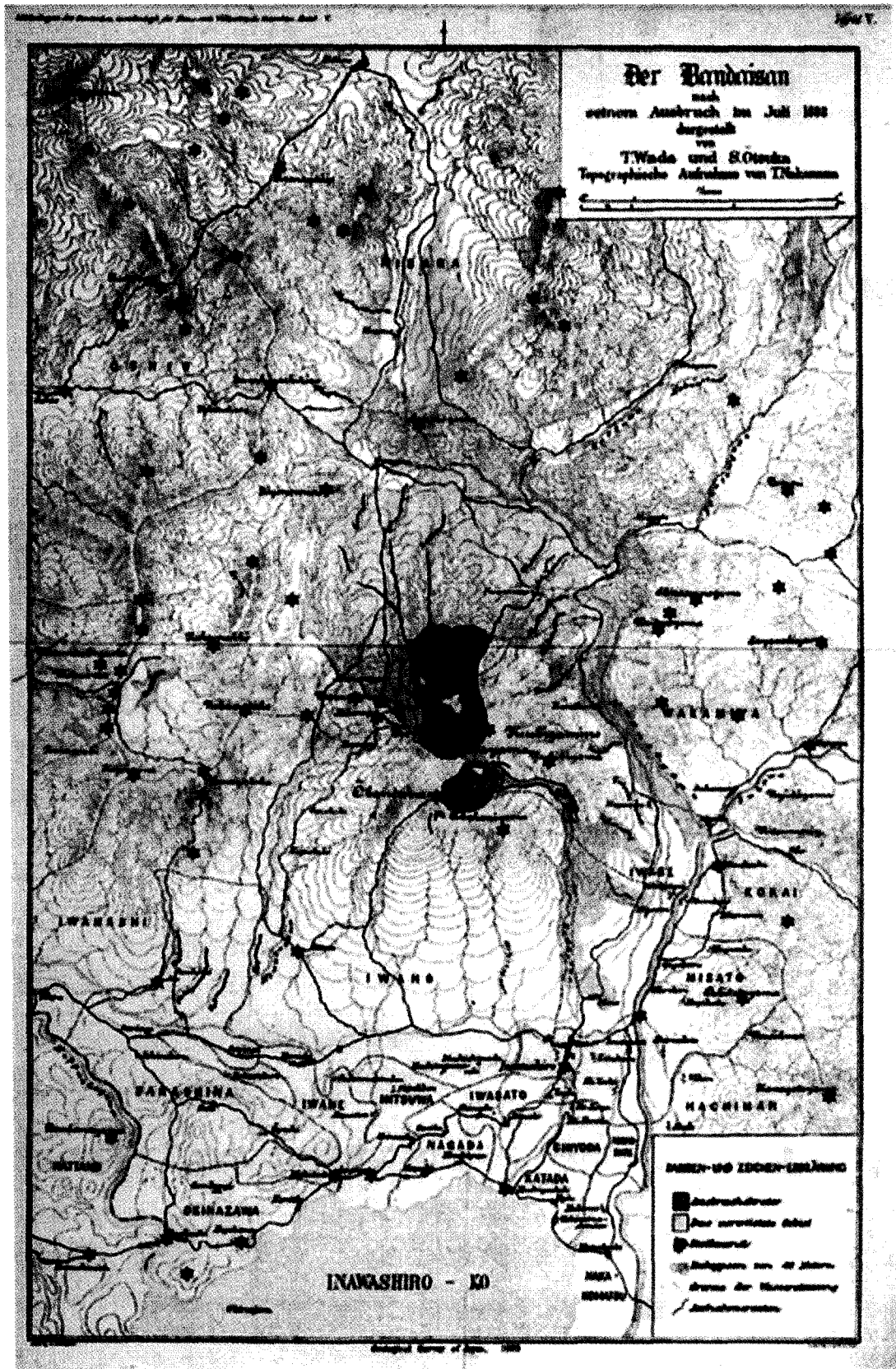


図-3 1889年図での対応点分布図

★: 対応点

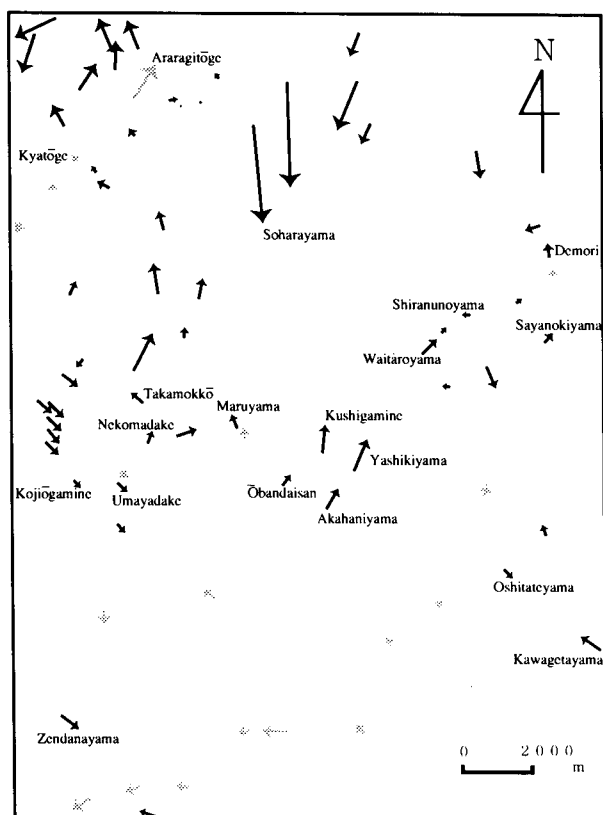


図-4 1次平面変換後の1889年図の誤差
 矢印の終点：図-3の対応点に1次平面変換を施した後の位置
 矢印の始点：1993年図における、図-3の対応点と同一の位置
 黒の矢印：山頂等の地形の対応点
 灰色の矢印：道路交差等の人工物の対応点

磐梯火山の北西側の大塩から松原へ向かう道路沿いの点であった。なお、これらの点は平面誤差については小さかった。蛇足だが、以前この道を通ったとき、山が迫っていて見通しが悪かったことを記憶している。

次に、標高変換の次数を決定するため、4.1で平面変換したデータに2~4次の標高変換を施し、その結果を比較検討する。4次平面変換後の等高線ラインカバレッジを、TINを経て、三次元座標 (x, y, z) のASCIIのポイントファイルに変換する。また、39点の対応点に2~4次の多項式変換式を適用させて最小二乗法により係数を決定する。次にこれらの変換係数を用いて、前述のASCIIポイントファイルの (x, y, z) 座標値に標高変換を施す。その後、ポイントファイルを変換し、LATTICEを経て、DEMを作成する。

各次数により変換した後の対応点の標高誤差の標準偏差（以下、標高標準偏差という）をみると、2次で51.9 m、3次で46.5m、4次で41.5mと緩やかに小さくなっているが、磐梯火山の山頂標高を個別に比べると、3次以上の変換では、小磐梯の山頂が大磐梯のそれより高

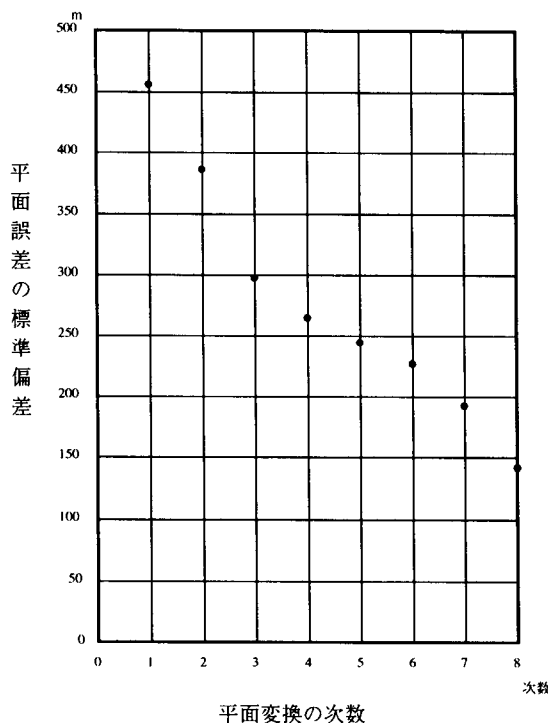


図-5 平面標準差の変化

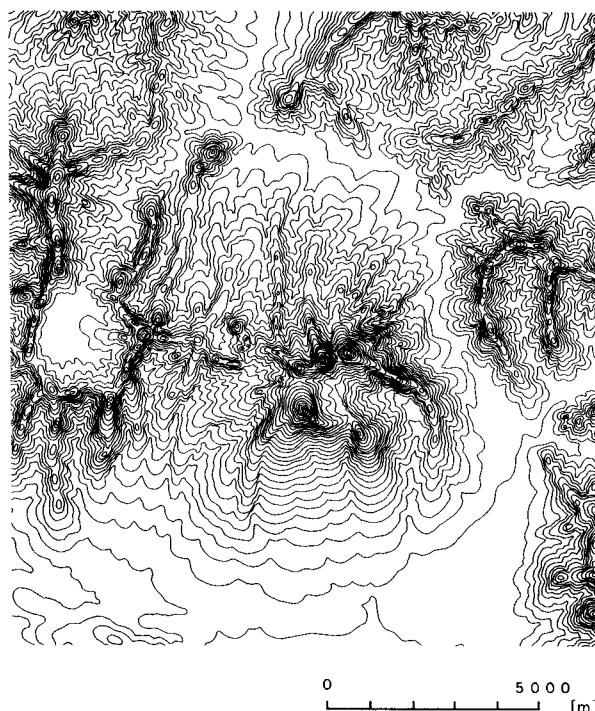


図-6 1889年図から読みとった等高線

かったり、大磐梯の標高が実際より100m以上低いなど、小磐梯崩壊前後高度差分量を求める際の誤差を大きくする結果になるので、標高変換の次数は2次とする。変換式は次に示す。

$$w = a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2 + a_3 \cdot v + a_4 \cdot v^2 + a_5 \cdot u + a_6 \cdot u^2 + a_7 \cdot z \cdot v + a_8 \cdot z \cdot u + a_9 \cdot v \cdot u$$

但し、(u, v, z) は平面変換後の1889年図の対応点の

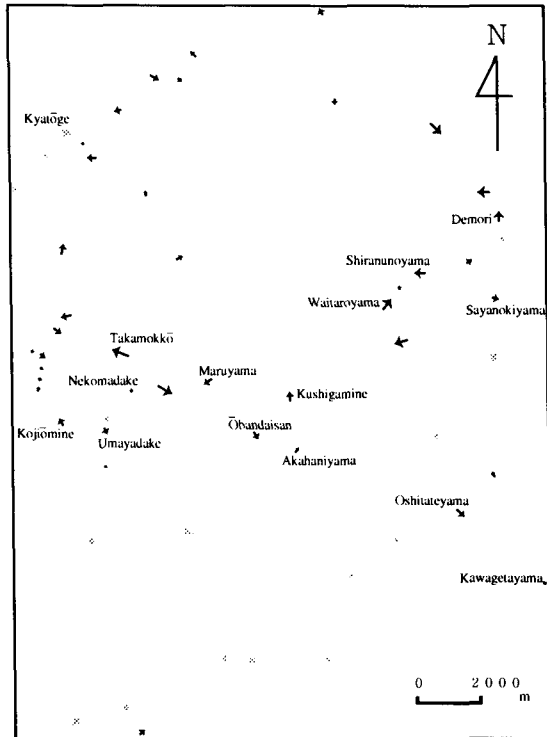


図-7 4次平面変換後の1889年図の誤差

矢印の終点：図-3の対応点に4次平面変換を施した後の位置

矢印の始点：1993年図における、図-3の対応点と同一の位置

黒の矢印：山頂等の地形の対応点

灰色の矢印：道路交差等の人工物の対応点

3次元座標であり、 w は1993年図に記された対応点近傍の等高線の標高である。 $a_0 \sim a_9$ は変換係数である。

以上で、1889年図の補正が終了したことになる。このようにして平面変換が4次・標高変換が2次の多項式によって補正した等高線により作成した50mメッシュのDEMを、以下、1889年補正DEMと呼ぶ。

5. 1926年図の数値化

1926年図は、標準経度修正直後に発行された地形図（1926年発行、1908年測図）であり、作成当時はまだ、多面体座標を用いている。1：50,000地形図「磐梯山」の図郭長を、UTM座標系と多面体座標系とで比べると、南北、東西ともその差が図上0.1mmである。

1926年図と1993年図に共通する三角点の平面座標及び図郭をディジタイザーで計測し、図郭の経緯度を使用してUTM座標系へ投影変換を行う。1993年図での三角点の座標を真位置と仮定して、1926年図の三角点の平面標準偏差を計算すると、三角点39点（1926年図に記載されている三角点のうち、1993年図の同三角点と比べて標高値が変化したものは三角点の移設の可能性があるのを除いた）の平面標準偏差は31.5mであった。この原因としては、ディジタイザー読み取り誤差（本報告で使用した

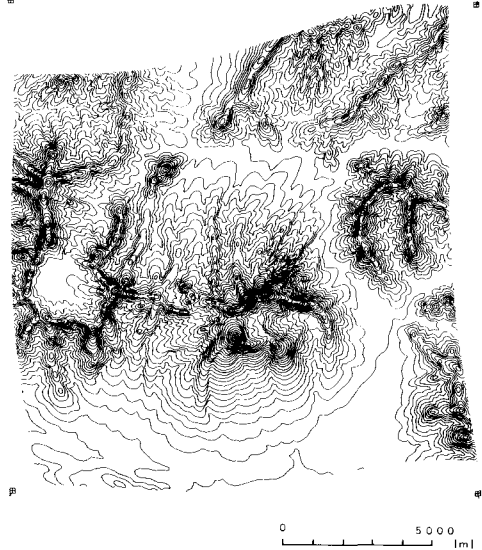


図-8 4次平面変換後の等高線

対応点のうち、磐梯山・猫魔山・古城ヶ峰・雄国山・名倉山・川桁山・一野山・白布山・出森山の9点について、1926年図上で、ディジタイザーで2回ずつ計測し、対応点毎に座標値の誤差を求めて平均したところ、10.26mであった。これは1：50,000地形図上では0.21mmにあたる、平板測量での地図作成行程中の誤差、紙の伸縮、座標系の違いによる誤差、三角点の移設等が考えられる。しかし、1926年図の対応点の平面標準偏差は、現在の1：25,000地形図の作業規程の制限である図上0.7mm以内（1：50,000地形図上の0.7mmは、地上35mにあたる）におさまっていることから、1926年図には多項式変換を施さないことにした。

1926年図の特徴として、三角点の平面標準偏差の東西成分について、地図の東半分がほとんどマイナスの値を持つという系統誤差が見られた。東西成分のみがもつ系統誤差であることから、経度に $10'' \cdot 4$ を加えるだけの1918年の標準経度修正が不十分であった可能性もある。1926年図と写真測量により作成した1961年発行の1：50,000地形図「磐梯山」を比較すると、1961年発行の地形図の方が東西のみ長かった。

1926年図からDEMを作成する手順は、1889年図の場合と同じである。作成されたDEMを以下、1926年DEMと呼ぶ。

1926年図の数値化範囲は磐梯火山を中心とする標高約800m以上の総面積約56km²の部分である。このうち、崩壊等の地形変化のなかった標高1300m以下の約29km²の部分について、1926年DEMと1993年DEM（6にて定義）の標高差から求めた標準偏差（以下、DEM標高標準偏差という）は、12.40mであった。

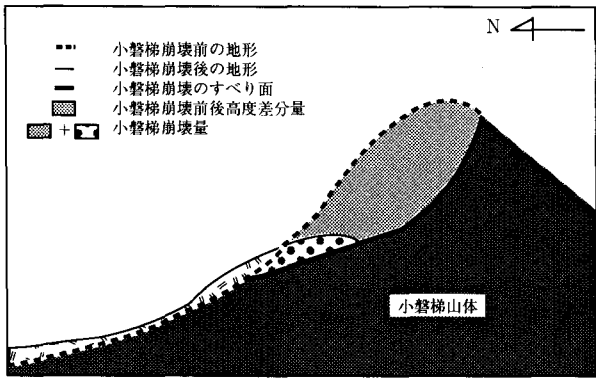


図-9 小磐梯崩壊前後の高度差分

6. 1993年図の数値化

1993年図の範囲のDEM (50mメッシュ) は国土地理院で既に作成されている。複数のDEMの差を取る場合、差をとる位置がずれると正確な値は出せない。1889年DEM自体が誤差を含んでおり、多項式変換を施した1889年補正DEMについても完全に歪みがとれた訳ではない以上、差分計算の結果に、他の要素からくる誤差の影響を及ぼさないようにする必要がある。作成方法の違いからくるDEMのずれを解消するために、1926年DEMの作成方法に合わせて、1993年図のDEMを作りなおすことにした。

1993年図についてはメッシュデータの他に1:25,000地形図の等高線及び湖のWITMAP形式ファイルが存在するので、それをARC INFOに移入して等高線ラインカバレッジ及び湖ポリゴンカバレッジを作成し、1926年DEMと同様の手順でDEMを作成することにした(以下、1993年DEMと呼ぶ)。

以下、1889年補正DEM、1926年DEM、1993年DEMを使用して差分計算を行ったが、その際、必要に応じて各TINデータを同じ座標値の範囲で切り抜いた形のDEMを使用した。

7. 小磐梯崩壊前後の高度差分量の計算

磐梯火山で起きた崩壊のいくつかの崩壊量の求め方を調べると、1888年の小磐梯崩壊の崩壊量は、小磐梯崩壊により形成された馬蹄形カルデラを測量し、小磐梯の位置・標高・概形を仮定して推定計算されている(Sekiya and Kikuchi, 1890)。一方、昭和8年の山津波の崩壊量(飯田波事, 1938)や1954年の湯桁山崩壊の崩壊量(佐藤留太郎ほか, 1956)は、堆積物の分布面積と平均の厚さを測量し、見積もったものである。このように、崩壊量の定義や算出方法は統一されていないため、一つの崩壊に対してどの方法を採用するかで異なる結果が出る可能性がある。

本報告では、図-9に示すように、「崩壊前の地表面(1889年補正DEM)と崩壊後の地表面(1926年DEM)に挟まれた、崩壊後空白になった部分(以下、崩壊部と

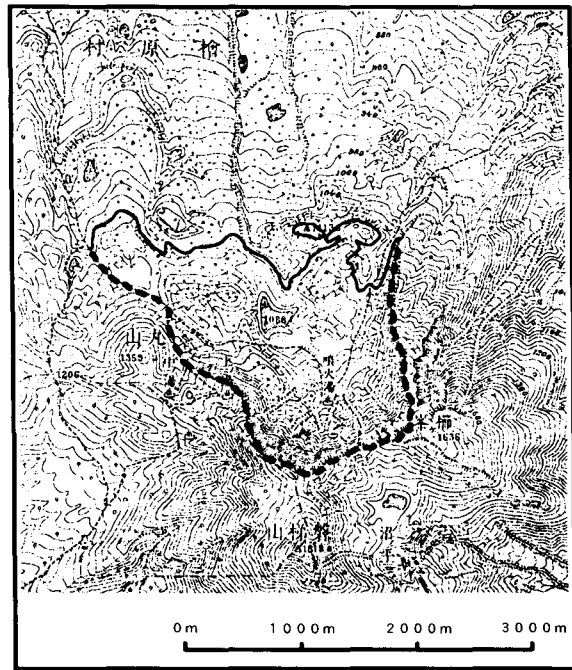


図-10 小磐梯崩壊前後の高度差分量の計算領域
実線：1100mの等高線
点線：崩壊壁

いう。これは1926年DEMから1889年補正DEMを差し引いたとき、マイナスになる部分にあたる。)の容量を崩壊前後の高度差分量として算出した。また、崩壊が起きた場所に崩壊した土石の一部が残っている可能性があるため、崩壊量は崩壊前の地表面と崩壊時のすべり面に挟まれた「崩壊時に土砂が移動した部分」の容量と考えたが、現在のところ、正確なすべり面のデータがないため、本報告では小磐梯の崩壊量は求められなかった。

小磐梯崩壊前後の高度差分量を求めるためには、計算の範囲(計算領域)を設定する必要がある。Sekiya and Kikuchi (1890)によると、崩壊の起きた地域は標高1170m以上の部分としている。本報告では図-10のように、1926年図において、標高1100mの等高線と崩壊壁に囲まれた部分を小磐梯崩壊前後の高度差分量の計算領域とした。

この領域内で、1889年補正DEMと1926年DEMから計算した小磐梯崩壊前後の高度差分量は、 $0.14 \pm 0.11 \text{ km}^3$ となった。但し、 $\pm 0.11 \text{ km}^3$ は誤差の推定値である。その求め方は、まず、磐梯火山周辺の地形変化のない部分について、1889年補正DEMと1993年DEMとのDEM標高標準偏差を計算する。この計算を行った領域の総面積は約 78 km^2 であり、DEM標高標準偏差は 81.8 m であった。このDEM標高標準偏差に崩壊部の面積(1.31 km^2 。範囲は、図-11に図示する。)を掛けて、崩壊前後の高度差分量の誤差の推定値とした。

また、本報告で設定した計算領域の外側である櫛ヶ峰の東側にも大きな崩壊が見られる。この崩壊部分も合わせた小磐梯崩壊前後の高度差分量を計算すると、 $0.18 \pm$

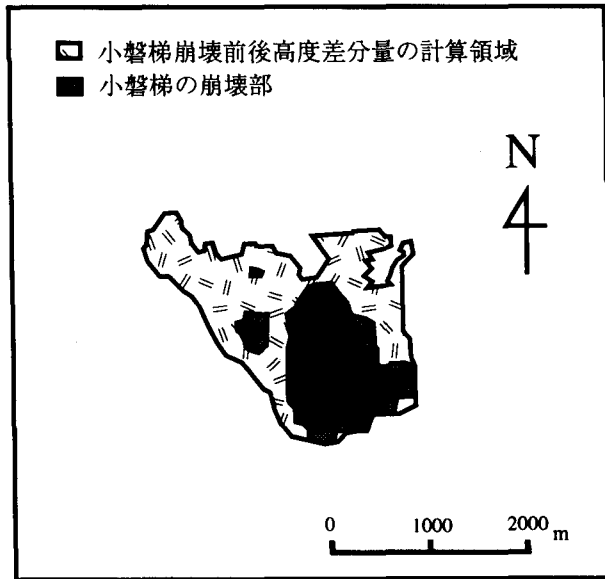


図-11 小磐梯の崩壊部

0.15km³であった。ここで、 $\pm 0.15\text{km}^3$ は上述と同様にして求めた誤差の推定値である。

次に小磐梯崩壊後から現在に至るまでの崩壊壁の高度差分量を求める。1926年DEMと1993年DEMを用いて、崩壊壁の崩壊範囲（標高1300m～1640m）を条件として与えた上で上述と同様に計算する。得られた高度差分量は $0.055 \pm 0.019\text{km}^3$ であった。蛇足だが、崩壊壁は常時、浸食が進んでいるため、得られた高度差分量にはこの影響が含まれていると考えられる。

8. 考察

8.1 等高線補正の適否

本報告で用いた等高線ベクタデータの補正方法には、1) 平面座標と標高を分ける、2) 対応点を用いて多項式変換を行うという二つの特徴がある。

1) については、平面座標と標高を同時に補正することは理論的に可能である。しかし、対応点には、平面変換には使えても標高変換には使えない点や、平面誤差が小さくても標高誤差が大きい点があり、本報告で区分けしたことは適切であったと考えられる。

2)の対応点については、さらに資料等を検討すれば、その数を増やすことは可能だが、今回は明らかに同一と判断できる点のみを使って対応点とした。また、1889年補正DEMについては、念のため、平面変換を4次と5次の二通り実施し、さらに2次の標高変換を施したDEMを用いて、それぞれ崩壊前後の高度差分量を求めた。しかし、崩壊前後の高度差分量の誤差の推定値を比べても、4次では $\pm 0.11\text{km}^3$ 、5次では $\pm 0.10\text{km}^3$ となり、大きく精度が向上することはないので、4次多項式で十分であると判断した。一方、多項式変換以外の変換方法としては、対応点を強制的に真位置に合わせたり、あるいは1889年図を部分的に切り張りしたりという方法

も考えられる。しかし、これらの方法では、誤差の評価が難しく、個人の意見・主観に左右される可能性が高い。また、多項式変換を施す際に対応点に重みをつけることも考えたが、1889年図の資料が乏しく、適当な重みをかけることが難しかったため中止した。以上のことから、客観的な補正を行うためには、本報告の対応点を用いた多項式変換は適切な手法であると考えられる。

8.2 1889年図の信頼性

現在の地形図の最終精度（標準偏差）は、地上の明瞭な地点の平面位置で図上0.7mm以内であり、また、等高線の高さの精度は、主曲線間隔の1/2以内である。これを1889年図の等高線に照らせば、平面誤差35m・標高誤差20mは許容範囲になるが（1889年図の等高線間隔は40m）、1889年図の精度はこの許容範囲を大幅に超えている。

陸地測量部で基準点に基づく1:50,000地形図の整備が始まったのは1892年以降であるが、1889年図が印刷されたのはそれ以前の1889年である。したがって、基準点に基づく測量ではなかった可能性が高く、現に1889年図には、基準点らしきものは描かれていない。そもそも、1889年図は地質局で作られているので、地質調査のための地図だった可能性もあり、事実、1889年図には山よりも澤の名前の方が、詳しく記録されている。これらの理由から、3年後に発行が始まった陸地測量部の地形図と比べて、1889年図は精度が低いと考えられる。しかし、縮尺や等高線間隔の記載をみても、1889年図は測量のもとに作成され、ある程度の精度は保証されていると考えられる。小磐梯崩壊前の地形を記す地形図として、1889年図より精度の高いものは見つかっていない以上、この1889年図を小磐梯崩壊前のデータとして使用する価値はあると考えられる。

DEM標高標準偏差が大きい領域は、主に山の斜面であり、山麓の低地に比べて約2倍である。その最大の理由は、平面変換で等高線を完全には修正できなかったため、標高の差を取ったときに尾根と谷がずれている部分でDEM標高標準偏差が異常に大きくなったことである。逆に崩壊域では崩壊後の地形は平坦であることから、崩壊域の縁以外は谷や尾根のずれは考慮する必要がないため、実際の崩壊前後の高度差分量の誤差は、本報告の推定値より小さいと考えられる。

8.3 古い地形図の読み込み

今回使用した地形図のように古く貴重なものになると、現物を借りて読み込むことは難しい。1889年図は見開きで本に付いている図であるため、そのままではドラムスキャナーで読み込むことが不可能であり、コピーを使った。1926年図も現物は持ち出し禁止でありコピーを使用した。線が劣化した古い地図だからこそ、現物を用いて作業することが望ましいが、実際には不可能な場合が

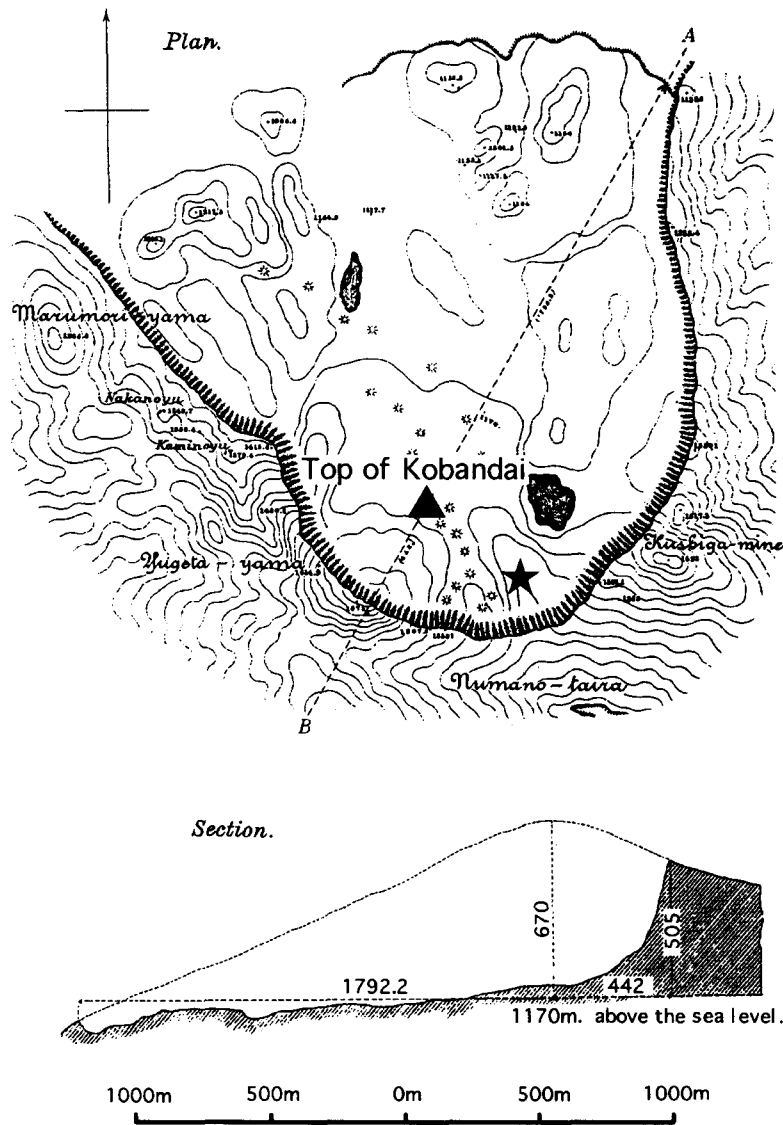


図-12 Sekiya and Kikuchi (1890) と1889年図での小磐梯の位置
 ▲: Sekiya and Kikuchi (1890) による小磐梯山頂位置
 ★: 4次平面変換後の1889年図での小磐梯山頂位置

多い。

8.4 傾斜図の変遷

1889年補正DEM, 1926年DEM, 1993年DEMから作成した傾斜図をそれぞれ口絵4, 5, 6に示す(以下, 1889年補正傾斜図, 1926年傾斜図, 1993年傾斜図と呼ぶ。白い部分は傾斜 $\theta = 0^\circ$)。

1889年傾斜図と1889年補正傾斜図を比べると55度以上の部分はかなり減少しており標高補正の影響が表れている。

また, 1889年補正傾斜図→1926年傾斜図→1993年傾斜図という傾斜の変化を観察しても, 急傾斜の部分が減少していく様子が分かる。

8.5 小磐梯崩壊前後の高度差分量

これまで一般に知られていた小磐梯の崩壊量は, Sekiya and Kikuchi (1890) が求めた 1.21km^3 という値であり, 本報告で得られた崩壊前後の高度差分量より一桁大きい。この差の原因の一つは小磐梯山頂の位置の違いにある。Sekiya and Kikuchi (1890) は小磐梯の山体を山頂1840mの位置を頂点とする円錐と仮定して標高1170m以上の山体部の半分以上が崩壊したとしているが, 図-12に1889年図における小磐梯山頂のおおよその位置を落としてみると, その位置はより崩壊壁に近い。この位置の違いは, そのまま崩壊量の違いに結びつけられる。もし, 小磐梯の位置が Sekiya and Kikuchi (1890) の通りならば, 1888年の崩壊は, 山体そのものが崩壊した大規模なものであったと考えられるが, 1889年図の通りならば, 小磐梯の山頂部分の崩壊と考えられる。後者は, 米地・千葉 (1988, 1989) の見解に一致する。

ここで、1888年小磐梯崩壊とよく比較されるセントヘレンズ火山(崩壊前の標高は2975m)の1980年崩壊について調べてみると、その崩壊量は 0.776km^3 と算出されている(高橋, 1981)が、この算出値は本報告で定義した崩壊前後の高度差分量であることが確認されている(宇井, 私信)。セントヘレンズ火山と小磐梯の災害を比較研究した文献によると、堆積物の量は明らかにセントヘレンズ火山の方が多い(中村・Glicken, 1988)。例えば、岩屑流の到達距離は、セントヘレンズ火山では20km離れたところでも厚さ100mの岩屑流堆積物が堆積していると報告されている(下鶴, 1981)が、小磐梯から20km離れた位置(檜原湖北岸のさらに6km北)には、1888年崩壊の堆積物は存在しない(国土地理院, 1993)。

また、 1.21km^3 という値は、円錐モデル計算で求めたものだが、このとき、すべり面まで考慮されていたか否か資料がないため、この値が本報告で定義した崩壊前後の高度差分量と崩壊量のうち、どちらに近い値なのかは不明である。しかし、現在ですら小磐梯崩壊時のすべり面の位置が完全には分からないために崩壊量を出すことは難しいことを考えると、当時、すべり面が測定されたとは考えにくい。また、この 1.21km^3 という値と本報告で求めた崩壊前後の高度差分量 $0.14 + 0.11\text{km}^3$ との差は、崩壊量の定義の違いや1889年図の誤差等による影響だけでは説明できないものである。したがって、本報告で算出した崩壊前後の高度差分量の値はセントヘレンズ火山災害と比較しても矛盾せず、Sekiya and Kikuchi (1890)の値よりも、他の研究及び調査事例と合致すると考えられる。

9. まとめ

本報告では、小磐梯崩壊前後の地形を表した1889年図及び1926年図を数値化した後、1889年図に多項式変換を施し、小磐梯崩壊前後の高度差分量及びその誤差を推定し、 $0.14 \pm 0.11\text{km}^3$ という値を得た。

図-4からも明らかのように、1889年図は、現在の地形図より大幅に精度が低い、絵地図とは異なり、一定の精度が保証されているものである。セントヘレンズ火山崩壊と比較しても、1889年図を用いて算出した小磐梯崩壊前後の高度差分量は、整合性がある。一方、従来の小磐梯崩壊当時の崩壊量の算出方法は原地形想定に基づいたものにすぎない。以上のことから、本報告の手法は崩壊以前の1889年図が入手でき、適切な補正ができれば、崩壊パラメータの定量的算出に有効な手法であると言える。

また、本報告の手法は過去の地形図の利用の幅を広げることにも役立つと考えられる。

謝辞

本報告は、1990年～1994年に行われた科学技術振興調整費による「火山地域における土砂災害予測手法の開発に関する国際共同研究」の中の磐梯火山をモデルとした岩屑なだれ災害に関する共同研究の一環として行われた。宇都宮大学の中村洋一助教授からは1889年図の補正方法に関して様々な御助言を頂いた。岩手大学の米地文夫教授からは1889年図や御自身の復元研究に関する多くの資料及び御助言を頂いた。北海道大学の宇井忠英教授には、セントヘレンズ火山災害に関しての質問に答えて頂いた。ここに深謝いたします。

参考文献

- 飯田波事 (1938): 昭和13年5月9日及び15日の磐梯山麓川上温泉付近における山津波びに流下せる火山灰質土砂の二三の物理的性質。験震時報, 16, Part 3, 658-681。
- 国土地理院 (1993): 1:15,000火山地形分類図, 磐梯山「1888年噴火による地形」。国土地理院技術資料, D・1-No.307。
- 佐藤留太郎・大野栄寿・佐藤一大・諏訪 彰(1956): 1954年春の磐梯山の山くずれ。験震時報, 10, No. 4, 29-36。
- 下鶴大輔 (1981): 噴火活動と災害の概況。セントヘレンズ火山の噴火活動とそれに伴う災害の研究。文部省科学研究費 (No.502401), 自然災害特別研究突発災害研究成果, 自然災害科学総合研究班 (代表下鶴大輔), 9-21。
- Sekiya, S. and Kikuchi, Y. (1890): The Eruption of Bandai-san. Trans. Seism. Soc. Japan. 13, 139-222。
- 高橋 保 (1981): 土石なだれと泥流洪水。セントヘレンズ火山の噴火活動とそれに伴う災害の研究。文部省科学研究費 (No.502401), 自然災害特別研究突発災害研究成果, 自然災害科学総合研究班 (代表下鶴大輔), 58-76。
- 中村洋一・Harry Glicken(1988): 磐梯火山1888年噴火のプラストとデブリ・アバランシェ堆積物。地学雑誌 97-4, 67-74。
- 水越博子, 星野 実, 米地文夫, 中村洋一, 津沢正晴, 小荒井衛, 大谷知生, 北原敏夫, 竹田裕子 (1994): 磐梯山1888年崩壊以前の地形復元。国土地理院地理調査部研究報告11, 33-41。
- 水越博子, 星野 実, 小荒井衛, 津沢正晴 (1995): 1888年以前の磐梯山の地形復元。磐梯火山, 岩屑流発生場に関する研究分科会, 163-169。
- Mizukoshi, H., KOARAI, M., HOSHINO, M., OHTANI, T., TSUZAWA, M. and KITAHARA, T. (1995): Former Terrain Model of Bandai Volcano just before the 1888 Collapse as restored from Pre-collapse. Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol.41, 95-104。

- 水越博子・村上広史(1997)：「磐梯山之図」を用いた小磐梯崩壊前後高度差分量の推計。地形，第18巻，第1号，21-36。
- 米地文夫(1992)：日本初の災害地形図「磐梯山之図」について。日本国際地図学会機関誌「地図」，Vol.30，No.3，1-13。
- 米地文夫・千葉則行・小沢明男・石丸聡（1988）：磐梯山1888年噴火に伴う大崩壊。地すべり学会第27回研究発表会講演概要集，20-21。
- 米地文夫・千葉則行（1989）：磐梯山1888年噴火における崩壊の量と裏磐梯地域の埋積。地形，第10巻，第1号，72。