

桜島火山の三次元浅部比抵抗構造

神田 径⁽¹⁾・小川 康雄⁽¹⁾・高倉 伸一⁽²⁾・小山 崇夫⁽³⁾・橋本 武志⁽⁴⁾・
小森 省吾^(5,6)・園田 忠臣⁽⁷⁾・佐藤 泉⁽¹⁾・井上 直人⁽⁸⁾・宇津木 充⁽⁵⁾

(1)東京工業大学火山流体研究センター, (2)産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門,
(3)東京大学地震研究所, (4)北海道大学大学院理学研究院, (5)京都大学大学院理学研究科,
(6)現：台湾中央研究院地球科学研究所, (7)京都大学防災研究所, (8)財地域地盤環境研究所

Three-dimensional shallow resistivity structure of Sakurajima volcano

Wataru Kanda⁽¹⁾, Yasuo Ogawa⁽¹⁾, Shinich Takakura⁽²⁾, Takao Koyama⁽³⁾,
Takeshi Hashimoto⁽⁴⁾, Shogo Komori^(5, 6), Tadaomi Sonoda⁽⁷⁾,
Izumi Sato⁽¹⁾, Naoto Inoue⁽⁸⁾, Mitsuru Utsugi⁽⁵⁾

(1) Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, (2) National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), (3) Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, (4) Faculty of Science, Hokkaido University, (5) Graduate School of Science, Kyoto University, (6) Now at: Institute of Earth Sciences, Academia Sinica (TAIWAN), (7) Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, (8) Geo-Research Institute

Abstract

We investigated a shallow resistivity structure of Sakurajima volcano by using an audio-frequency magnetotelluric (AMT) method. Measurement was made at 23 locations on the flanks of the volcano in 2011, which was supplementary to the AMT data of 27 sites measured in fiscal year 2007. Assuming that the underground structure did not change from 2007 through 2011, we inferred a three-dimensional (3-D) resistivity structure model using both data set. As a result, the spatial resolution of underground structure was improved and distribution of shallow resistivity layers of Sakurajima volcano became clearer. In addition, we have constructed the model that incorporated the topography. Some preliminary calculations show that the inferred 3-D structure does not depend on the initial model so much.

1. はじめに

桜島火山は、1955年より南岳山頂火口における爆発的噴火を繰り返してきたが、2006年6月からは昭和火口における小規模な爆発的噴火が発生するようになった。2010年以降は昭和火口において年間800回を超える爆発回数を記録し、噴火規模も当初に比べて随分大きくなっている。一方、歴史時代に溶岩流を流出した噴火（天平宝宇、文明、安永、大正）では、いずれも山腹に火口を形

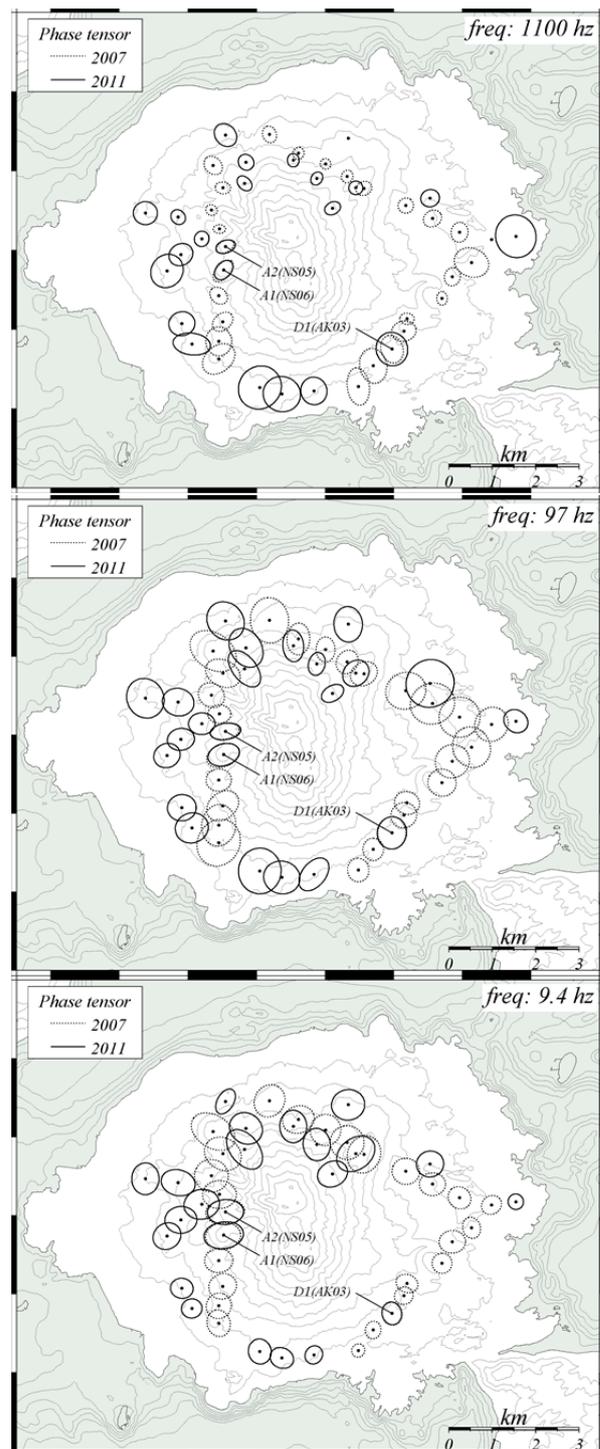
成しており、現在の昭和火口における活動も将来的に山腹からの溶岩流出へ至る可能性が十分に考えられる。そこで、桜島火山の浅部構造を明らかにし、山腹からの噴火可能性を評価することを目指して、AMT法を用いた比抵抗構造調査を2007年と2011年に実施した。火山体の浅部構造は、火山噴火の多様性を生じる場であり、特に地下水の分布を把握しておくことは、火山防災の面からも重要である。

2. データ

2007年の調査で取得されたデータに対する、二次元および三次元構造解析の結果については既に報告されており、桜島地下浅部の不均質な構造が明らかとなっている(神田・他, 2008; Kanda *et al.*, 2013)。しかしながら、2007年の調査では、桜島の山腹に設定した3測線に沿ってデータが取得されたため、空間的な分解能に問題があった。2011年度の調査では、これを補うためにより広範囲のデータ取得を行うとともに、3か所では2007年度調査とほぼ同一の場所での繰り返し観測を行い、火山活動の活発化に伴った地下構造の時間変化の有無を調べた。

第1図に、フェーズテンソル(Caldwell *et al.*, 2004)の分布を3つの周波数について2007年のデータと併せて示す。楕円の分布は、2007年と2011年のデータセットで整合的である。桜島の東側では各周波数とも円に近い楕円形状を示しており、構造が一次元的であることを示唆している。その他の地域でも、楕円の主軸方向は水平方向で連続的に分布しており、周囲の観測点で矛盾は見られない。桜島北東部の観測点付近(2007年データのGK測線中央部付近)では、楕円形状の傾向が地形起伏を境に西側と東側で顕著に変化しており、地形に沿った構造境界の存在が推測される。

繰り返し測定を行った観測点で取得された両年度の探査曲線を比較してやると、3観測点ともほぼ重なっているが、高周波数帯域および数Hz帯域に



第1図：周波数1100, 97, 9.4Hzにおけるフェーズテンソルの分布。2007年取得データを波線、2011年データを実線で表す。

Fig.1: Phase tensor ellipses of measured AMT data at frequencies of 1100, 97, and 9.4 Hz. The data obtained in 2007 (dashed line) and in 2011 (solid line) are shown.

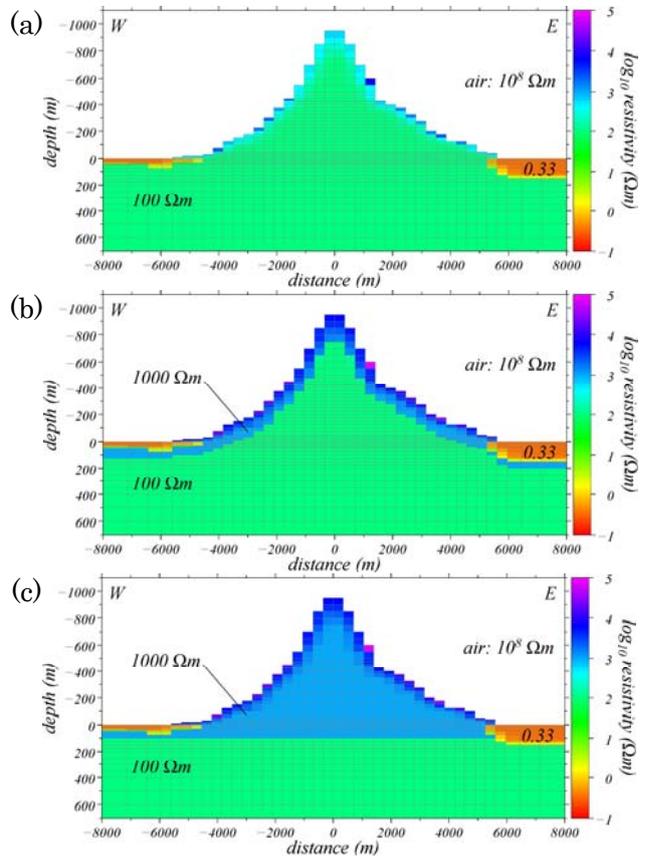
において若干のずれも見られた。フェーズテンソルの分布（第1図）を見ても楕円は概ね重なっているが、各周波数で完全には重なっていない。一次元構造モデルによる検討の結果、変化があったのは表層の100m程度であり、その下部ではほとんど変化がなかったことがわかった。そこで本研究では、2007年から2011年にかけて地下構造に軽微な変化しかなかったと仮定し、両方のデータセットを併せて三次元構造の推定を行った。

3. 三次元比抵抗構造の推定

三次元比抵抗構造解析は、Siripunvaraporn and Egbert (2009) の三次元インバージョンコードを使用して行なった。Kanda *et al.* (2013) では、2007年度調査のデータのみを用いて三次元比抵抗構造を推定しているが、中央の山体の地形が考慮されていなかったため、今回は地形も含めてモデリングを行った。

地形を考慮したインバージョンでは、モデルの最上面を桜島の最高標高に近い1100mとし、それより下の空気に相当する直方体ブロックの比抵抗値を $10^8\Omega m$ 、海水に相当するブロックの比抵抗値を $0.33\Omega m$ で固定した。地形モデルは、陸上は国土地理院の標高データ（50mメッシュ）、海底は海上保安庁の等水深データから作成した。なお、空気または海水と陸地との境界を含むブロックには、その体積割合で重みを付けた平均値を初期モデルでは与え、可変ブロックとした。

計算メッシュは、桜島南岳を中心とする $11.9km \times 11.9km$ の領域をコア領域とし、領域内の水平メッシュを均等に350mとした。コア領域の外側は、中心から離れるに従ってメッシュサイズを大きくした。鉛直メッシュは、海水準の上下50mを10mとし、深くなるにつれてサイズを大きくした。山体を含む標高1100mまでのメッシュは、観測点のある標高500mまでを25mとし、それより上部は50mとした。全計算領域は $68.5km \times 68.5km \times 38.9km$ で、 $52 \times 52 \times 68$ ブロックの比抵抗値を3種類の初期モデルに対して推定した（第2図）。計算においては、インピーダンスの全成分を用い、エラ



第2図：三次元インバージョンに用いた3種類の初期モデル。(a) $100\Omega m$ 一様構造。(b) 地形に沿った2層構造（厚さ100mの上層は $1000\Omega m$ 、下層は $100\Omega m$ ）。(c) 山体全体が $1000\Omega m$ 一様の比抵抗値を持つ2層構造。

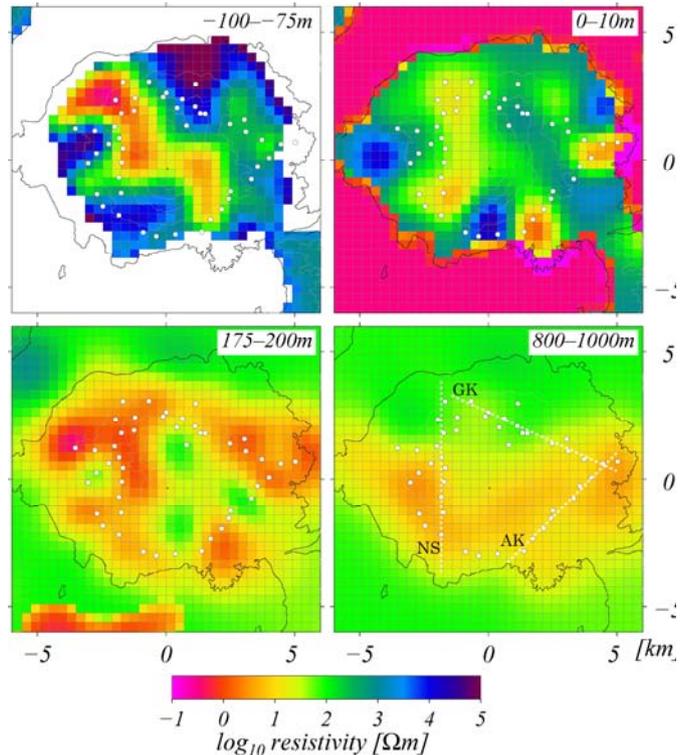
Fig.2: Three kinds of initial models used for the 3-D inversion. (a) A uniform half-space with a resistivity of $100\Omega m$. (b) A two-layer model along the topography: the resistivity of the upper layer (100m in thickness) and of the lower layer is $1000\Omega m$ and $100\Omega m$, respectively. (c) A two-layer model in which the whole volcanic edifice has a uniform resistivity of $1000\Omega m$.

ーフロアを一律に 5%とした。周波数は 3000Hz~2Hz の間の 15 周波数を用いた。第 2 図で示した 3 種類の初期モデルに対する RMS 誤差は、それぞれ (a) 16.7、(b) 18.6、(c) 22.0 であり、インバージョンにより推定した最適モデルの RMS 誤差は、それぞれ (a) 2.28、(b) 2.23、(c) 2.18 であった。

第 3 図に、初期モデルとして第 2 図 (c) を用いて得られた三次元比抵抗構造モデルの水平断面図を 4 つの深さで示す。観測点のない桜島中央部は感度がなく、観測点付近の構造のみ信頼度が高い。山体内部の海拔 100m 付近では、桜島北西部に低比抵抗領域があり、東部~南東部にかけてやや比抵抗の低い領域が広がっている。北部安永火口周辺からその北側にかけて、および桜島南部~南西部にかけては高比抵抗を示している。海拔 0m 付近の深さになると、数 Ωm ~数十 Ωm のやや低比抵抗領域が見られるようになり、海拔下 200m 付近では、全島的に数 Ωm より低い比抵抗の領域が広がっている。一方、北部安永火口周辺と南東部の鍋山周辺では、この傾向に反して 100 Ωm 程度のやや高い比抵抗値を示している。さらに深部の海拔下 800m では、浅部から続く低比抵抗が桜島南部に広く見られるが、北部では 100 Ωm 程度のやや高比抵抗を示すようになる。可探深度付近であるため検討の余地はあるものの、基盤構造に関係した構造が見えている可能性がある。これらの傾向は、Kanda *et al.* (2013)

で示された三次元構造モデルの特徴と大局的には整合的であるが、観測点が増えたことにより空間的な分解能が上がり、桜島浅部のより詳細な比抵抗構造が明らかとなっている。

第 4 図には、2007 年調査時の 3 測線 (AK, GK, NS) に沿った三次元比抵抗構造モデルの断面図を示す。第 2 図で示した 3 種類の初期モデルに対応する 3 つの三次元モデル (a~c) と地形を含まないモデル (d) の断面図を各測線で比較している。地形を含まないモデルは、初期モデルとして地表から 100m が 1000 Ωm 、その下が 100 Ωm 一様の 2 層構造モデル (RMS=16.0) を用い、インバージョンで得られたモデルの RMS 誤差は 1.66 であった。まず、(a) ~ (c) の断面図を比べてみる。海水準より上の山体内の構造に若干の差異が見られるものの、図で示した範囲においてはほ

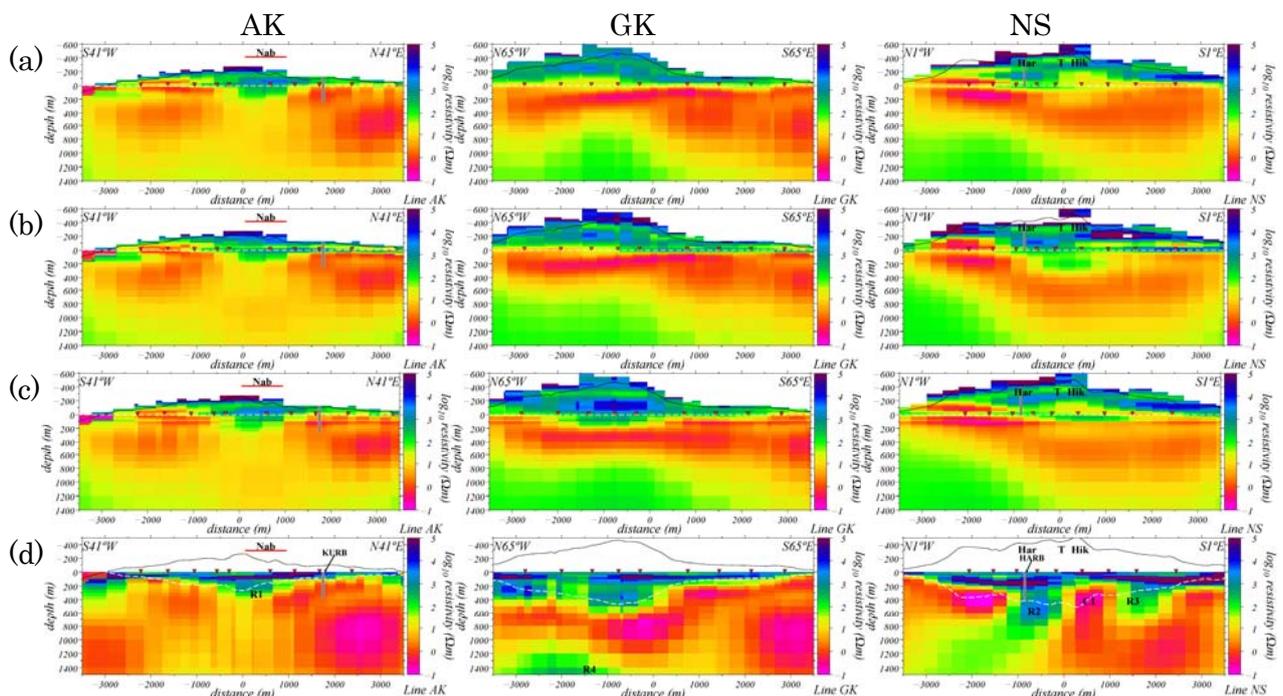


第 3 図：初期モデルとして第 2 図 (c) を用いた場合の三次元比抵抗構造モデル。深さ-100m (左上)、0m (右上)、175m (左下)、800m (右下) における水平断面図 (コア領域を表示)。白丸は観測点。白点線は第 4 図の AK, GK, NS の各測線を示す。

Fig.3: Horizontal slices taken through the core area of the 3-D resistivity model estimated by using Fig.2(c) as the initial model. Depths are indicated in the top-right corner of each plot. White dots denote AMT sites and white dashed lines indicate measurement lines of the 2007 survey (AK, GK, and NS), along which cross sections in Fig.4 are drawn.

ば似通った構造が推定されており、初期構造の違いはそれほど結果に反映されていない。違いが見られるのは、NS 測線の引の平溶岩ドーム (Hik) 周辺や GK 測線中央部など地形が急な場所で、推定された比抵抗分布のばらつきが大きく、適切に地形の効果が表現されていない可能性がある。

一方、地形を含まないモデル (d) と地形を含むモデルを比較すると、AK 測線や GK 測線では、表層の高比抵抗部の厚さは両者とも同程度であり、地形をそのまま平らにならすと (d) のモデルと似た構造が得られると思われる。一方、NS 測線では、地形を含まないモデルで海水準程度の深さで低比抵抗と高比抵抗のコントラスト (C1、R2、R3) が見えていたが、地形を含めたモデルではあまり明瞭な特徴は見えていない。初期モデルにはあまり依存しない結果が得られていることから、これも表層の地形表現が適切でないことに起因していると思われる。より細かいデジタル地形



第 4 図：測線に沿った 4 つの三次元比抵抗構造モデルの鉛直断面図。(a)～(c)：初期モデルとしてそれぞれ第 2 図(a)～(c)を用いて推定されたモデル。(d)：地形を含まないモデル。各モデルで 3 つの断面図を示している：AK 測線(左)、GK 測線(中)、NS 測線(右)。黒実線は各測線に沿った地形を表し、白波線は海水準を示す。灰色の太線はボアホール(HARB、KURB)の位置と深さを示す。Nab: 鍋山軽石丘、T: 大正火口、Har: ハルタ山溶岩ドーム、Hik: 引の平溶岩ドーム。

Fig.4: Resistivity cross sections along measurement lines extracted from four 3-D models. (a)~(c): Models calculated by using Fig.2(a)~(c) as the initial model. (d): A model in which the topography was not incorporated. Three cross sections are shown in each model: the AK line (left), the GK line (center), and the NS line (right). Black solid and white dashed lines indicate the topography of each profile and sea level, respectively. The vertical gray bar shows the location and depth of the boreholes (HARB and KURB). Some geographic features are labeled (Nab: Nabe-yama pumice cone; T: Taisho crater; Har: Haruta-yama lava dome; Hik: Hikino-hira lava dome).

データを使用し、メッシュサイズをさらに小さくすればある程度の改善は見込まれる。しかしながら、メモリや計算時間などの制約が大きくなるため、Müller and Haak (2004) で提案されているような観測点付近の地形モデルを調整するなどの対策を行う必要がある。

4. まとめ

桜島山麓において 2007 年および 2011 年に取得した AMT データを用いて、地形を含めた三次元比抵抗構造モデルを推定した。その結果、観測点を追加したことによって地下構造の空間分解能が上がり、桜島山麓浅部の比抵抗分布がより明瞭になった。北部安永火口周辺の浅部地下構造には顕著な低比抵抗異常が見られず、むしろ高比抵抗であることが確認され、桜島北西部にも低比抵抗異常が存在することが明らかとなった。また、桜島北部では基盤構造が見えている可能性がある。地形を含めたモデルでは、デジタル地形やメッシュ設計に検討の余地が残されているが、初期モデルにはあまり依存しない結果が得られた。

謝 辞

AMT 観測を実施するにあたり、国土交通省九州地方整備局大隈河川国道事務所ならびに同桜島砂防出張所、林野庁九州森林管理局鹿児島森林管理署、鹿児島市危機管理課ならびに同河川港湾課にご協力をいただきました。また、京都大学防災研究所の井口正人教授をはじめとする火山活動研究センターの皆様ならびに地震防災研究部門の吉村令慧准教授からもご協力をいただきました。三次元インバージョンコードはタイ国 Mahidol 大学の Weerachai Siripunvaraporn 博士から提供を受け、東京工業大学学術国際情報センターの Tsubame2 を用いて計算しました。記してお礼申し上げます。

参考文献

- Caldwell, T. G., Bibby, H. M., and Brown, C., The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, **58**, 457-469, 2004.
- 神田 径・山崎友也・橋本武志・坂中伸也・山田健太・小川康雄・相澤広記・高倉伸一・小山崇夫・小林 幸・小森省吾・桜島電磁気構造探査グループ, 桜島火山における AMT 法比抵抗構造調査, 第 10 回桜島火山の集中総合観測, 89-104, 2008.
- Kanda, W., Yamazaki, T., Ogawa, Y., Hashimoto, T., Sakanaka, S., Aizawa, K., Takakura, S., Koyama, T., Yamada, K., Kobayashi, T., and Komori, S., Shallow resistivity structure of Sakurajima volcano revealed by audio-frequency magnetotellurics, *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.*, **58**, 2013 (in press).
- Müller, A. and Haak, V., 3-D modeling of the deep electrical conductivity of Merapi volcano (Central Java): integrating magnetotellurics, induction vectors and the effects of steep topography, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **101**, 129-154, 2004.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation, *Phys. Earth. Planet. Interiors*, **173**, 317-329, 2009.