跡津川断層クリープ域におけるVLF-MT探査

著者	山下 太，久保 篤規，酒井 英男，浦 泰宏，竹内 章，小村 健太朗
雑誌名	防災科学技術研究所　研究報告
巻	68
ページ	125-135
発行年	2005-09
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00001166

跡津川断層クリープ域における VLF-MT 探査

山下　太*・久保篤規**・酒井英男***・浦　泰宏***・竹内　章***・小村健太朗*

VLF-MT Survey in the Creep Segment of the Atotsugawa Fault

Futoshi YAMASHITA*, Atsuki KUBO**, Hideo SAKAI***,
Yasuhiro URA***, Akira TAKEUCHI***, and Kentaro OMURA*

*Solid Earth Research Group,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
yamafuto@bosai.go.jp, omura@bosai.go.jp
**Kochi University, Japan
akubo@cc.kochi-u.ac.jp
**Toyama University, Japan
hsakai@sci.toyama-u.ac.jp, takeuchi@sci.toyama-u.ac.jp

Abstract

Earth resistivity structure survey was carried out using VLF-MT method in the region that is considered to be a creep segment of the Atotsugawa fault. In this area, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention drilled a hole down to a depth of 350 m in 2003. Recovered cores were fractured continuously, and many shear planes holding fault gouge were observed therein. Many fault outcrops were found on the right bank of Atotsu-gawa River, which is 60 m distant from the drilling point. Strikes of the shear planes in outcrops were N30°-47°E, which is different from that of the Atotsugawa fault (~N60°E), and were close to the azimuth from the outcrops to the drilling point (N32°-42°E). These observations suggested the existence of en echelon structure in this area, and the en echelon fracture zone was possibly drilled. To investigate the relationship between the fractures in the drilled cores and those on outcrops, we performed detailed VLF-MT survey in the area around the segment between the drilling point and fault outcrops. The result of survey revealed the wide-range distribution in apparent resistivity (10-1,000 Ωm) and local low-resistivity band along a line passing the drilling point and the fault outcrops. Short-period element of spatial variation in resistivity distribution revealed en echelon structure that has a strike of N21°-44°E. Therefore it is presumed that fracture zones observed along drilled cores and those found at outcrops are identical.

Key words : Atotsugawa fault, Creep segment, En echelon structure, VLF-MT, Resistivity structure

1. はじめに

中部地方北西部には，東北東－西南西方向に走向を持ち，右横ずれが卓越した跡津川断層系が存在する（**図 1**）．その一つである跡津川断層は，約 60-70 km の長さをもち，日本を代表する A 級活断層であるとともに，特徴的な活動を示すことから，多くの活断層・地震研究者の注目を浴びている．跡津川断層は 1858 年に安政飛越地震を引き起こし，当時の飛騨地方および北陸地方に大きな被害をもたらしたが，現在においてもなお，微小地震が断層に沿って帯状に発生している（たとえば，Ito and Wada, 2002）．大局的にはこのような地震活動のパターンを示す一方で，断層の中央部には浅部に地震活動がほとんど見られない地域が存在し，さらにこの地域では，光波測量の結果から，約 1.5 mm/yr のクリープ運動を生じさせている事が明らかとなっている（多田，1998）．それに対し，東部および西部の浅部においても微小地震活動が活発な地域において

*独立行政法人　防災科学技術研究所　固体地球研究部門
高知大学，*富山大学

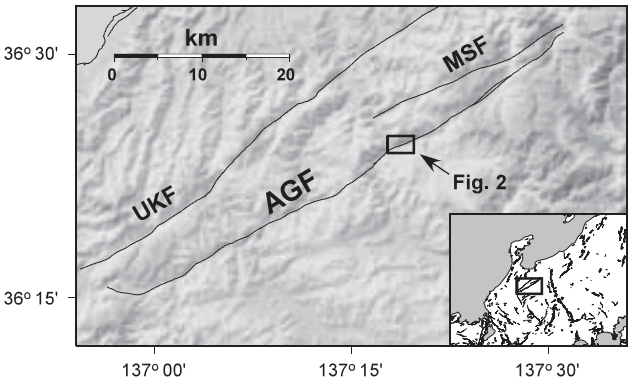


図 1　活断層デジタルマップによる跡津川断層系の分布図（中田・今泉編，2002）．AGF: 跡津川断層，UKF: 牛首断層，MSF: 茂住祐延断層．跡津川断層上の実線で囲まれた範囲が**図 2** に示されている．

Fig. 1　Distribution map of Atotsugawa fault system after the Digital Active Fault Map of Japan（Nakata and Imaizumi eds., 2002）. AGF: Atotsugawa fault, UKF: Ushikubi fault, MSF: Mozumi-sukenobu fault. The region enclosed by solid lines on the Atotsugawa fault is shown in **Fig. 2**.

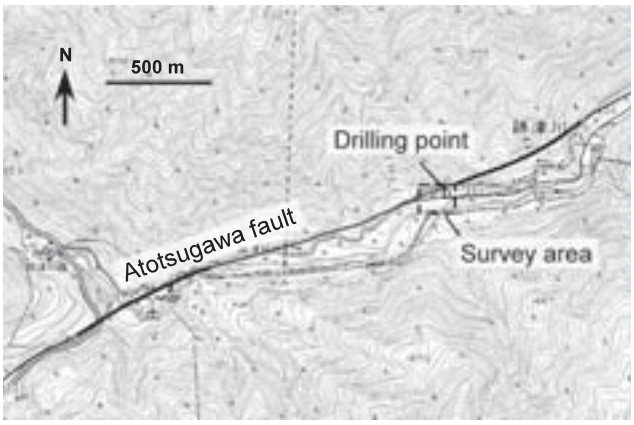


図 2　VLF-MT 法による構造探査をおこなった地域周辺の地形図．国土地理院 2 万 5 千分の 1 地形図を使用．図中の点線で囲まれた範囲が**図 6** に示されている．

Fig. 2　Topographical map around the region in which the VLF-MT survey was carried out. 1:25,000 scale topographical map published by the Geographical Survey Institute in Japan is used. The region enclosed by dashed line is shown in **Fig. 6**.

は，そのようなクリープ運動は確認できなかったため，断層は固着していると考えられている．同一の断層において固着域とクリープ域とが共存している内陸断層は，日本国内には他には例がなく，詳細に調査する事で地震発生のメカニズム解明に寄与すると考えられている．近年では，跡津川断層系が新潟から神戸まで続く，新潟－神戸ひずみ集中帯の中に存在することも示されており（Sagiya *et al*., 2000），一層の注目を浴びている．

これらの理由より，2003 年には防災科学技術研究所が，跡津川断層のクリープ域と解釈される地域で深度 350 m までのボーリング掘削をおこなった（小村他，2004）．このボーリングの掘削地点を**図 2** に示す．採取されたボーリングコアはほぼ全深度で破砕されており，多数の深度で断層粘土を含むすべり面が確認された（**図 3**）．一方，この掘削点近傍の跡津川の川岸では，青灰色の破砕帯を含む断層露頭が，複数発見されている（ハスバートル他，2001；山田他，2005）．発見された露頭の中でも，右岸の露頭のすべり面は，跡津川断層の平均的な走向（~N60°E）とは異なる走向（N30°-47°E）を示している．観察された右岸の露頭の写真（一部）を**図 4** に示す．露頭および孔内で観察される断層すべり面の傾斜はともに高傾斜であり，それらが同一のものであるか，あるいは，この地域には垂直に近い傾斜を持つ雁行した断層破砕帯が複数存在している可能性を示唆している．今回われわれは，そのような雁行状の破砕帯の可能性を確認し，ボーリングから得られた破砕度の高い岩石との関連を調べるため，物理的な手法による構造探査を計画した．特に，破砕度の高い岩石の検出には，電気比抵抗の調査が有利であるので，平面的な探査が容易な VLF-MT（Very Low Frequency Magneto-Telluric）法を用いた比抵抗構造探査をおこなった．

2.　VLF-MT 探査

VLF-MT 法とは，人工的に放射されている VLF 帯の電磁波を利用した MT 法の一種である（物理探査学会，1998）．日本国内では主に，宮崎県えびの市から放射されている 22.2 kHz の電磁波が利用されており，本研究でもこれを利用した．VLF-MT 法は測定が簡便で，1 回の測定に要する時間がわずか数分という利点があるため，地下の平均的な比抵抗値の平面的な分布をとらえるのに適した手法である．そのため，断層破砕帯の構造を調査する目的等で広く利用されている（たとえば，Yamaguchi *et al*., 2001）．特に跡津川断層では，中央部および南西部において，Oshiman *et al*.（1987）によって VLF-MT 法を使った探査がおこなわれ，断層破砕帯と思われる低比抵抗帯が発見されている．ただし，利用する電磁波の周波数が基本的に単一であるため，表皮深度が一つに固定され，詳細な構造探査をおこなうことはできない．電磁波の表皮深度は，通常の MT 法と同様に次の式に従う．

$$d = 503(\rho/f)^{1/2} \qquad (1)$$

ここで d は表皮深度（m），ρ は媒質の比抵抗（Ωm），f は電磁波の周波数（Hz）である．したがって，大地の比抵抗が均質に 10 Ωm，100 Ωm，1,000 Ωm のとき，22.2 kHz の電磁波の表皮深度は，それぞれ 11 m，34 m，106 m である．実際には大地の比抵抗は 3 次元的に不均質であるため，鉛直方向および水平方向に電磁波が浸透した領域の，平均的な比抵抗値が測定結果として得られる．これを見かけ比抵抗と呼び，式（1）にこの値を代入したものが探査深度として用いられる．実際の測定では，互いに直交する電場と磁場とが同時に測定され，次の式によって見かけ比抵抗が得られる．

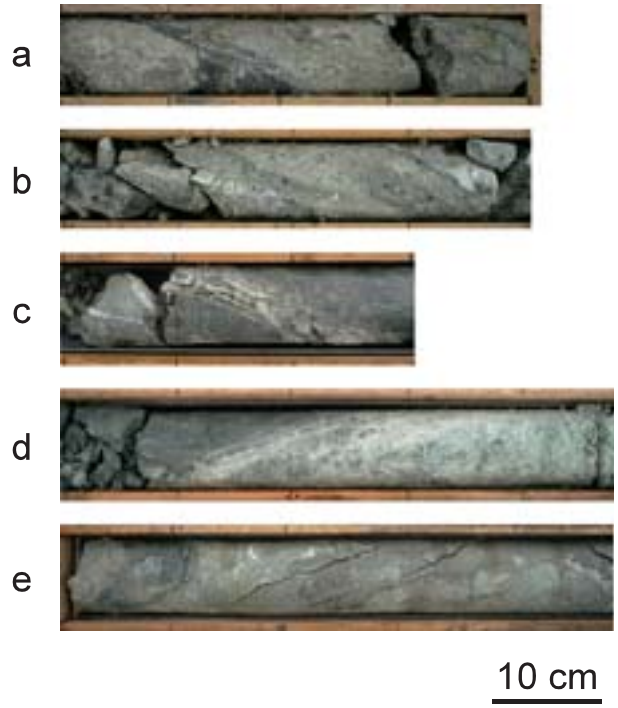


図 3　防災科学技術研究所によるボーリングによって採取されたコアの中で，明瞭なすべり面の見られる箇所の写真例．採取されたコアはほぼ全域で破砕され，走向は決まらないものの多数の点で断層粘土を含むすべり面が見られた．示しているコアの深度は，それぞれ a）95.6-96.0 m, b）116.5-116.9 m, c）188.1-188.4 m, d）300.3-300.8 m, e）342.0-342.5 m.

Fig. 3　Photographs of some drilling cores having clear slip planes, which were collected by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. Most of the cores are heavily fractured, and many shear planes holding fault gouge were observed. Depths of cores shown in photographs are a）95.6-96.0 m, b）116.5-116.9 m, c）188.1-188.4 m, d）300.3-300.8 m, and e）342.0-342.5 m, respectively.

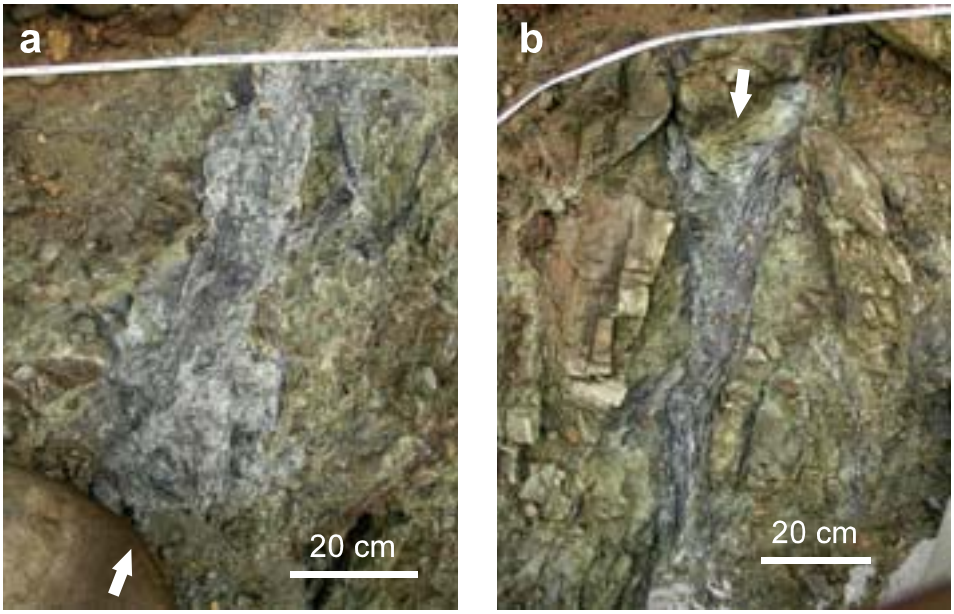


図 4　跡津川の右岸で見つかった断層露頭の写真例．白い矢印で示す箇所に，青灰色の断層粘土が見られる．a）走向：N40°E，傾斜：80°S，b）走向：N45°E，傾斜：90°N.

Fig. 4　Photographs of some fault outcrops found on the right bank of the Atotsu-gawa River. White arrows indicate the location of blue-gray fault gouges. a）Strike: N40°E, Dip: 80°S, b）Strike N45°E, Dip 90°N.

$$\rho=0.2T\,|E/H|^2 \qquad (2)$$

ここで T は電磁波の周期（s），E は電場強度（mV/km），H は磁場強度（nT）である．さらに，電場と磁場との位相の差も測定される（以降では単に位相と記述）．位相は比抵抗構造の深さ方向の変化を示すパラメータである．均質媒質での位相は 45° であるが，深部の比抵抗が表層より高い場合，位相は 45° より小さくなり，逆に深部の比抵抗が低い場合は 45° より大きくなる．

本研究では VLF-MT 探査装置として，テラテクニカ社製 VL-101 使用した（**図 5**）．仕様上の比抵抗および位相の測定精度は，それぞれ ±10%，±2° である．探査対象の構造の走向が明らかな場合は，走向に直交する方向の電場を測定することで変化を検出しやすいが，今回は予想される構造の正確な走向が不明のため，測定点ごとに最大となる方向の磁場を測定し，それに直交する方向の電場を測定した．電場測定用の電極間隔は 5 m とした．測定点を固定し，スタッキング回数を変えて測定したところ，このサイトでは 16 回のスタッキングで安定した結果が得られることが判明したので，スタッキング回数は基本的に 16 回とした．**図 6** に探査測線および掘削点と断層露頭の位置を示す．探査はまず，掘削点と断層露頭の間に存在する事が予想される，およそ北東－南西方向の走向をもつ構造を検出するために，その構造を横切る東西方向の A1，A2，A3 測線（以下，A 測線と略す）で探査をおこなった．測点間隔は約 5 m とした．さらに，A 測線の探査結果から見つかった，異常な高／低比抵抗の構造を



図 5　使用した VLF-MT 探査装置（テラテクニカ社製 VL-101）．

Fig. 5　VLF-MT survey devices used in this study (Terra Technica, VL-101).

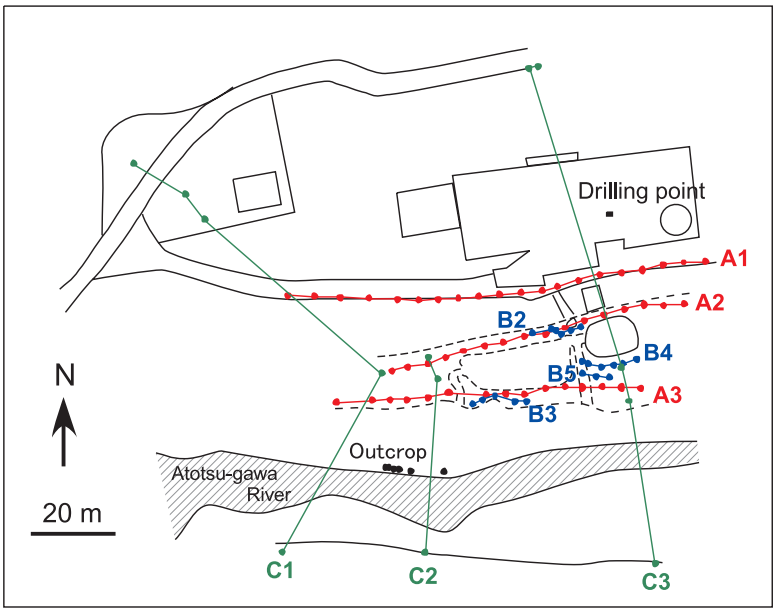


図 6　VLF-MT の探査測線と掘削点および断層露頭の分布図．赤，青，緑でプロットされている線が，それぞれ A，B，C 測線である．

Fig. 6　Distribution map of the VLF-MT survey lines, drilling point, and fault outcrops. A, B, and C survey lines are shown in red, blue, and green, respectively.

重点的に調査するために，B2，B3，B4，B5 測線（以下，B 測線）を設定し探査した．さらに，探査領域内の比較的広範囲に渡る大きな構造を明らかにするため，南北方向の C1，C2，C3 測線（以下，C 測線）を設定し探査をおこなった．

3. 測定結果

図 7 および **8** に，A，B 測線の，測線ごとの東西方向沿いの見かけ比抵抗と位相を示す．ここでは，より上段のプロットがより北側の測線での探査結果を示している．**図 9**，**10** は C 測線の，南北方向の見かけ比抵抗および位相であり，より上段のプロットがより西側の測線での探査結果を示している．図に示すとおり，得られた見かけ比抵抗は 10-1,000 Ωm の広い範囲にわたっている．ただし 100 Ωm 程度の測定結果を示すものが多く，探査深度は 30 m 程度と考えられる．A2，A3 測線には，特徴的な高／低比抵抗のパターンが見られる．A2 測線の比抵抗の空間的な変動パターンは，変動の大きさを除けば，A3 測線のパターンが東へ 10 m ほどシフトしたものと一致するように見える．前に述べたように，得られる見かけ比抵抗は鉛直方向のみならず水平方向も含めた領域の平均的な値である．したがって，ここで見かけ比抵抗の分布が示しているプロファイルと同一の構造が地下にあるわけではない．しかし，測定は測定点の直下の構造に最も敏感であるので，得られた比抵抗分布が，概して横方向の地下構造の空間的な変化を反映していることは確かである．

一方，位相は，理論的にはどのような構造であろうと 45°±45° の値を示すべきだが，測定結果ではその範囲を越えているものも多い．これは局所的な浅部構造の影響により，ガルバニックディストーションを受けているためと考えられる．これを補正するには，浅部の比抵抗探査データが必要であるので，本研究においては位相の情報を今後の議論には用いないこととする．

見かけ比抵抗の空間的な分布と，断層露頭および掘削点の位置関係とを把握するために，比抵抗の値を色に対応させてプロットしたものを**図 11** に示す．跡津川の右岸から 20 m ほど北の，露頭と掘削点とを結ぶ線上に，特徴的な低比抵抗領域が存在している．一方，探査領域の北端および南端では，比抵抗が高くなる傾向が得られた．

4. 議論

通常，破砕度の高い岩石は間隙率が高いために含水率が高くなり，比抵抗が低くなる特徴を示す．したがって**図 11** に示される，露頭と掘削点とを結ぶ線上にある見かけ比抵抗の低い領域もまた，跡津川断層の特に破砕度の高い領域を示している可能性がある．しかしながら，この低比抵抗領域は，活断層デジタルマップに示されている断層トレースから，南に約 90 m もの距離がある（中田・今泉編, 2002）．一方, 多数のボーリング調査の結果からは，この地域の跡津川断層の主断層は，跡津川の南側にあると示されている（たとえば，金属鉱業事業団，1990）．これらの調査結果の不一致は，この地域における跡津川断層が明瞭なひとつづきの断層ではないことを示唆している．実際に，破砕されたコアが採取された掘削点も，断層露頭も，中田・今泉編（2002）や金属鉱業事業団（1990）で示されているどちらのトレース上でもない．したがって，掘削点および断層露頭も含めた領域一帯が，100 m を超える非常に幅広い破砕帯内にある可能性がある．**図 11** に示される低比抵抗領域は，その破砕帯の中でも特に破砕の集中した領域を示しているのだろう．

図 7 に示される A2，A3 測線の高／低比抵抗のパターンは，掘削点と断層露頭との間に位置する特徴的な構造をとらえていると考えられる．また，A2 測線と A3 測線のパターンが対応しているように見えることは，少なくとも A2 測線と A3 測線間でこの構造が連続している可能性を示唆している．そこで，掘削点－断層露頭間の探査結果を取り出し，短周期の構造に注目するために，測線ごとの大きなトレンドを，空間ハイパス・フィルターを用いて除去した．ここでは比抵抗の空間的な変動の位置が重要となるため，位相ずれが生じないよう，データの双方向からフィルターをかけた．カットオフは 60 m とした．フィルターを通した比抵抗の分布が，**図 12** である．トレンドを除去する事で，短周期の変動が明瞭になり，雁行状の比抵抗構造が明らかとなった．**図 12** では高／低比抵抗の帯の推定位置を，それぞれ赤と青の直線で示している．これらの雁行構造の走向は，N21°-44°E であり，東側の構造の走向ほど，南北方向に近づく傾向を示している．これらの走向は，断層露頭で確認されたすべり面の走向（N30°-47°E）および，断層露頭から掘削点に対する方向（N32°-42°E）と調和的であり，雁行状の破砕帯構造が跡津川右岸からボーリング地点にいたる探査領域内で連続かつ広範囲に分布していることを示唆している．

5. 結論

跡津川断層のクリープ域で VLF-MT 法による電気比抵抗構造探査をおこなった．探査の結果，以下のことが明らかとなった．

1）探査領域内の見かけ比抵抗は，10-1,000 Ωm の広い範囲にわたる分布を示しているが，断層露頭と掘削点とを結ぶ線上に，10 Ωm 程度の低い比抵抗をもつ領域が局所的に存在する．一方，探査領域の北端および南端の比抵抗は高くなる傾向にあった．

2）見かけ比抵抗の分布の空間的なトレンドを除去し，短周期の空間変動に注目すると，跡津川断層の走向（~N60°E）に斜行する，高／低比抵抗の帯（雁行状の構造）の存在を示唆する結果が得られた．それらの雁行状の比抵抗構造の走向（N21°-44°E）は，跡津川の右岸にある断層露頭のすべり面の走向（N30°-47°E）および断層露頭に対する掘削点の方向（N32°-42°E）と調和的である．

以上より，**図 11** に示される低比抵抗領域および**図 12** に示される低比抵抗の帯は，跡津川断層の走向に斜行する雁行状の破砕帯の一つを示していて，ボーリングはその破砕帯の中を貫いたものと考えられる．今回，存在が示唆

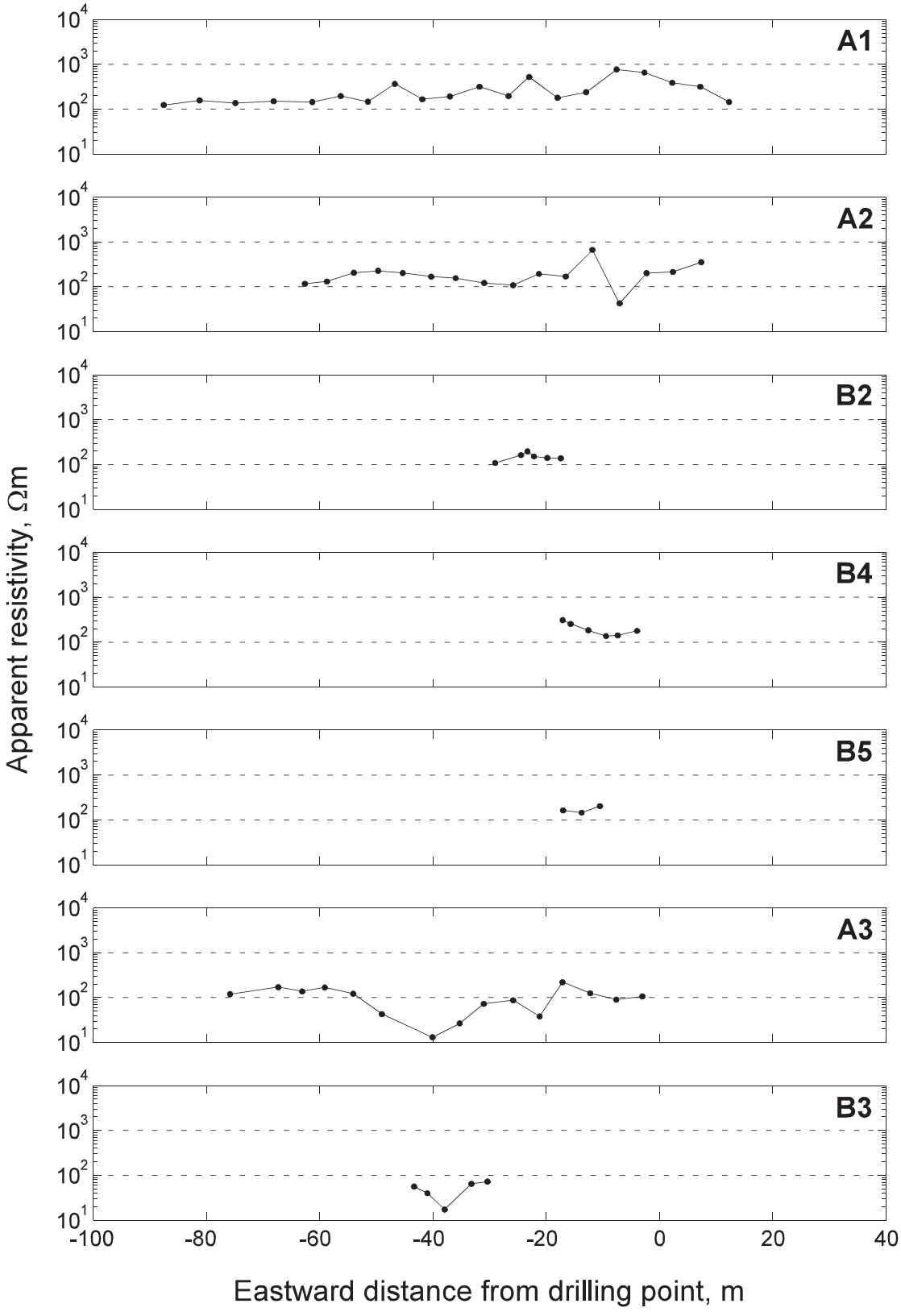


図 7　A 測線および B 測線の測線ごとの見かけ比抵抗．より上段の図がより北側の測線での測定結果を示す．
Fig. 7　Apparent resistivity profiles along A and B lines. Resistivity profiles are shown in sequence from north to south.

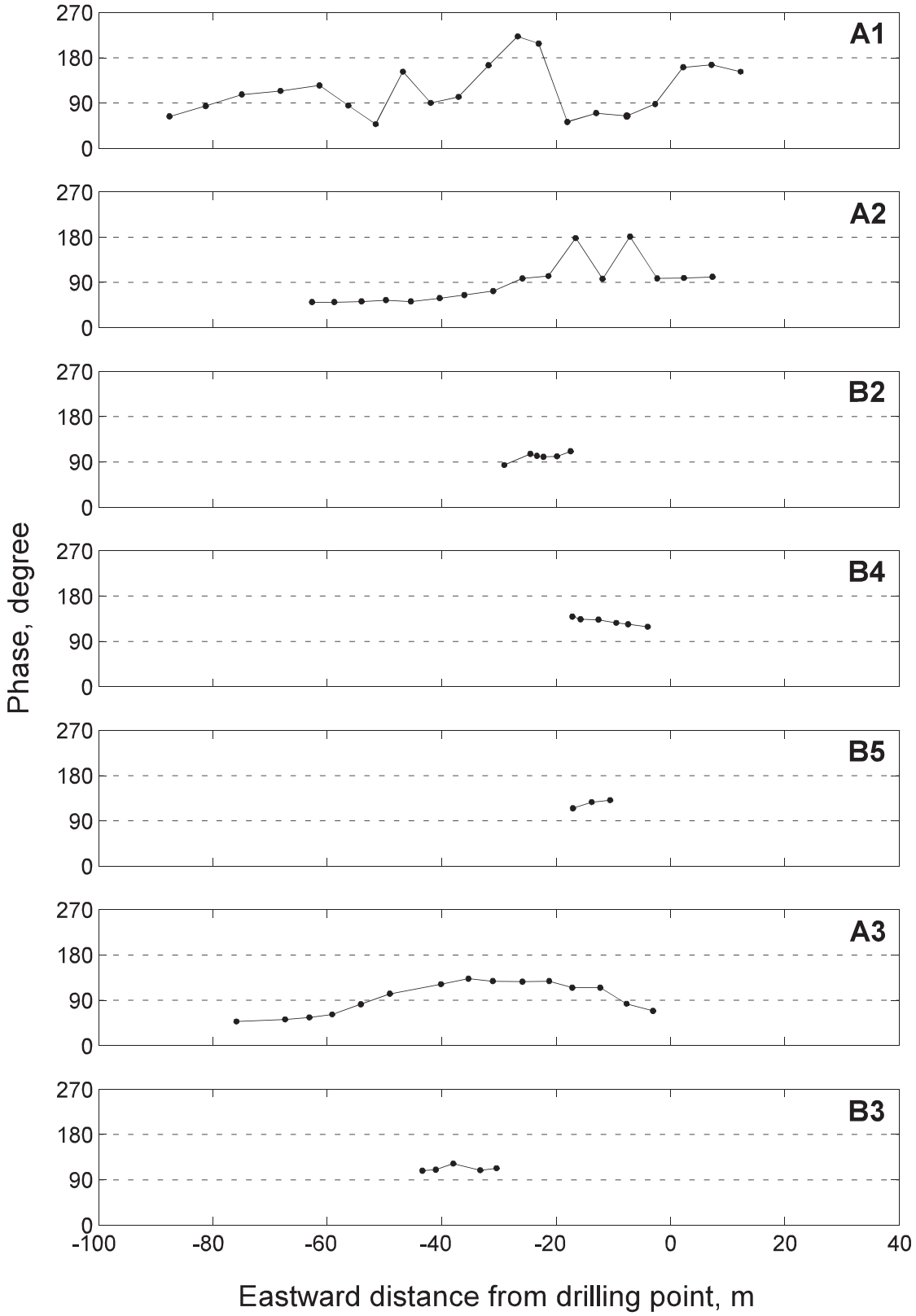


図 8　A 測線および B 測線の測線ごとの位相．図の並びは**図 7** と同じである．

Fig. 8　Phase profiles along A and B lines. The order of figure is same as that of **Fig. 7**.

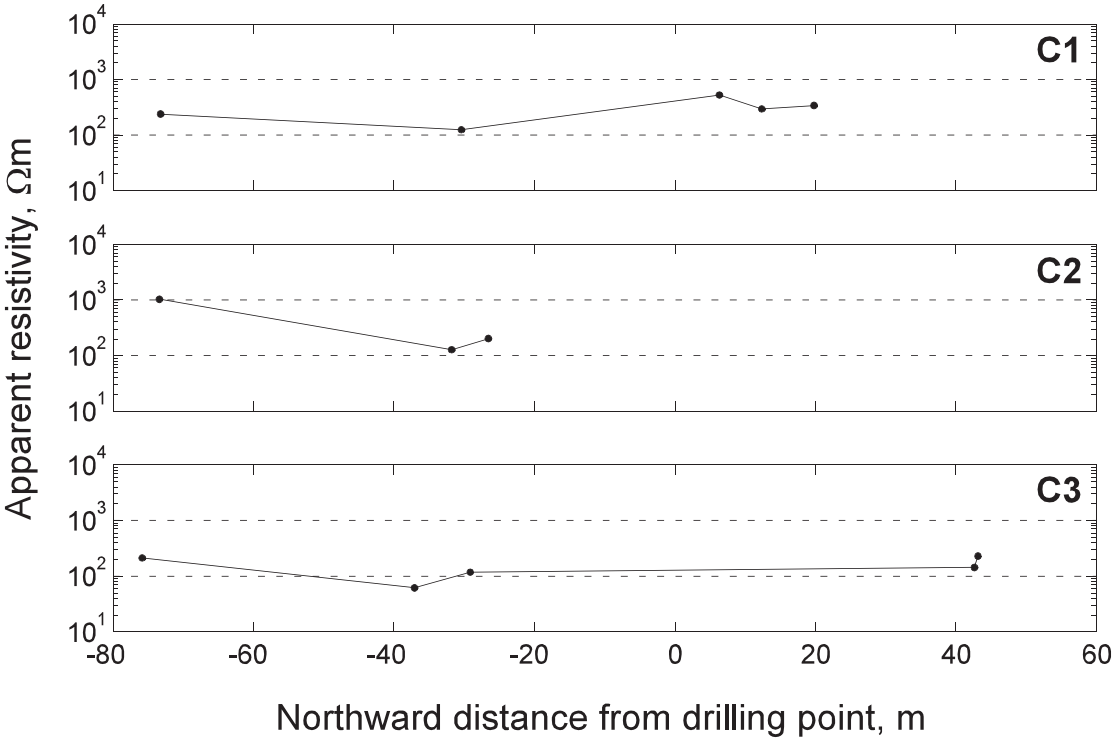


図 9　C 測線の見かけ比抵抗．より上段の図がより西側の測線での測定結果を示す．

Fig. 9　Apparent resistivity profiles along the C lines. Resistivity profiles are shown in sequence from west to east.

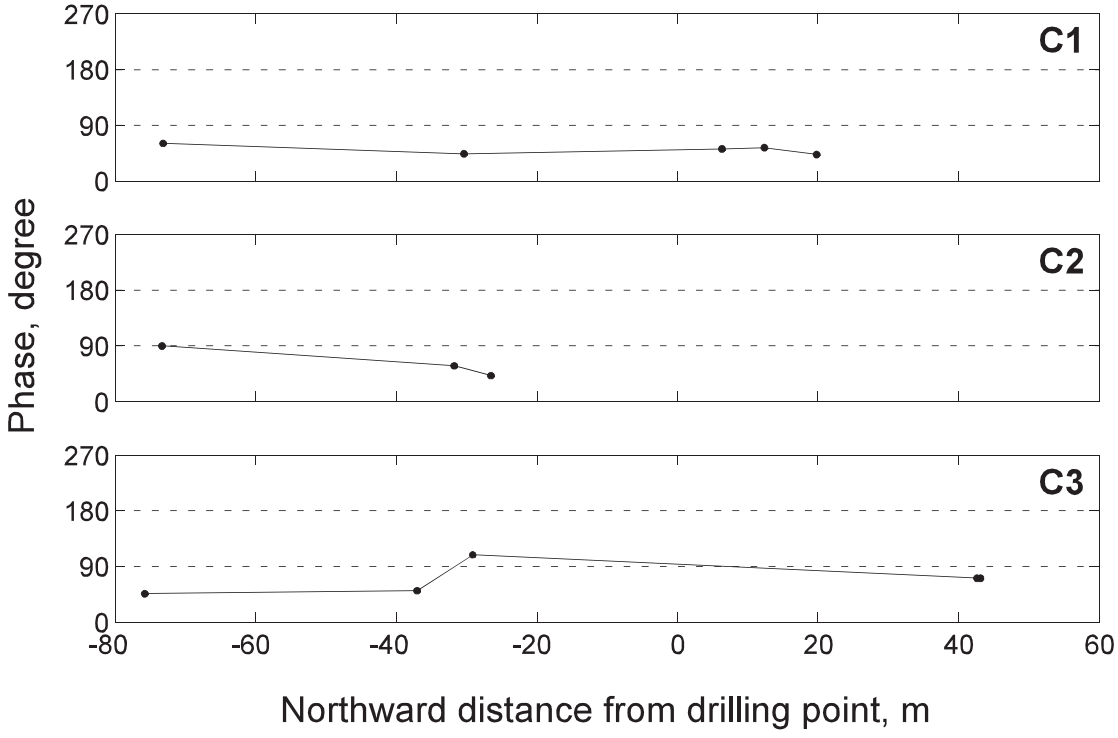


図 10　C 測線の位相．図の並びは**図 9** と同じである．

Fig. 10　Profiles of phase difference between the electric ant magnetic fields along C lines. The order of figure is same as that of **Fig. 9**.

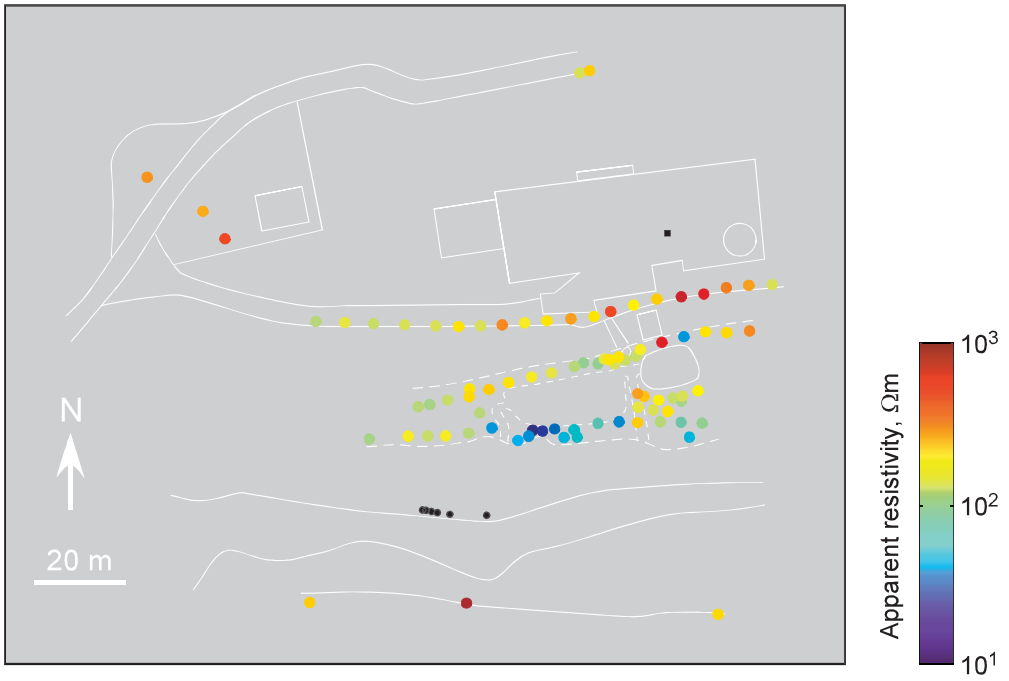


図 11　見かけ比抵抗の平面分布および掘削点，断層露頭の位置．断層露頭と掘削点とを結ぶ線上に低い比抵抗の領域がある．跡津川の右岸から離れるにしたがい，比抵抗が高くなる傾向が見られる．

Fig. 11　Spatial distribution of apparent resistivity, together with locations of drilling point and fault outcrops. Low-resistivity band is recognized along a line passing from the drilling point and fault outcrops. Apparent resistivity increases according to the distance from the right bank of the Atotsu-gawa River.

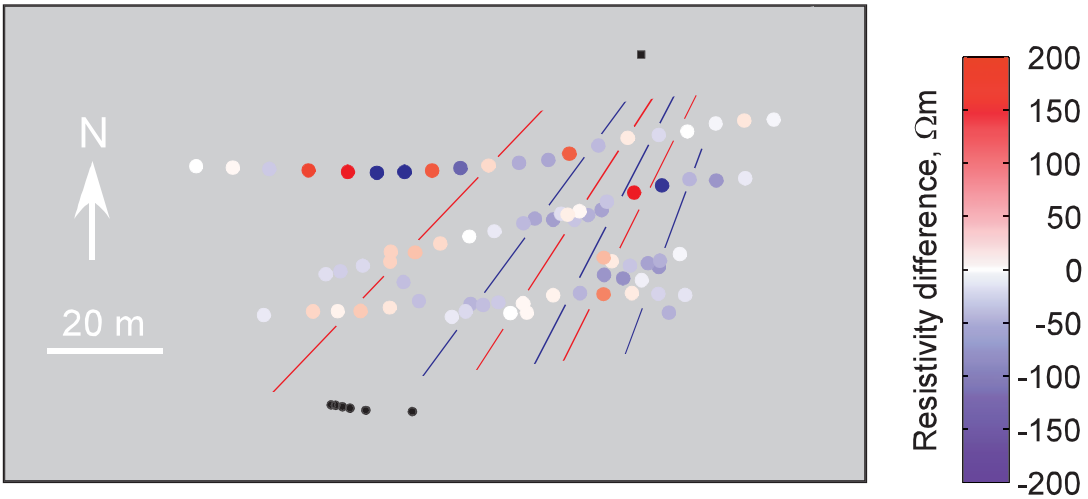


図 12　トレンドを除去し，短周期の空間変動に注目した見かけ比抵抗の平面分布図．高／低比抵抗の帯の推定位置が，それぞれ赤と青の直線で示され，雁行状の破砕帯を示唆している．雁行構造の走向は N21°-44°E であり，東側の構造ほど走向が南北方向に近づく傾向がある．

Fig. 12　Short-period element of spatial variation in resistivity distribution obtained by subtracting the long-period trend. Estimated zones of high and low resistivity are indicated by red and blue solid lines, respectively, which suggest the existence of en echelon fracture zone. Strike of the en echelon structure range N21°-44°E, and that of eastern part is approaching to N-S direction.

された雁行状の破砕帯は，これまでに知られていた跡津川断層のトレースから離れた位置にあることから，この地域での断層は単純なひとつづきの断層ではないと考えられる．それぞれに報告されている二つの断層が実際に平行に存在し，この地域でステップオーバーしていると考えれば，雁行状の破砕帯は二つの断層をつなぐ構造であると解釈できる．あるいは，発見された雁行状の破砕帯が，跡津川断層中央部のクリープ運動と関わりがある可能性もあり，今後も断層露頭で採取された断層粘土の化学・年代分析や，さらに古地磁気学的な分析もおこなって，多角的にその成因･特徴を調査する必要がある．また，より広範囲かつ詳細な構造探査をおこない，主断層の位置を特定することも必要である．

謝辞

本研究をおこなうにあたり，（株）神岡鉱山には多大な便宜をはかっていただいた．現地での VLF-MT 探査では，富山大学理学部の山本卓氏，岩崎博史氏にご協力いただいた．（株）三和ボーリングのハスバートル氏には，断層破砕帯の構造に関して有益な議論をしていただいた．以上の皆様に厚く御礼申し上げます．

参考文献

1）物理探査学会（1998）：物理探査ハンドブック．366-369，物理探査学会．

2）ハスバートル・安江健一・竹内章・那須忠利・高見明（2001）：跡津川断層中部で新たに確認された断層露頭（速報）．活断層研究，No.**20**，46-51．

3）Ito, K., and Wada, H.（2002）: Observation of micro-earthquakes in the Atotsugawa Fault region, central Honshu, Japan - seismicity in the creeping section of the fault. in Seismogenic Process Monitoring, edited by Ogasawara, H., Yanagidani, T., Ando, M., 229-243, Balkema, A.A., Lisse.

4）金属鉱業事業団（1990）：平成 2 年度 精密調査報告書 飛騨地域．25-26，金属鉱業事業団．

5）中田高・今泉俊文 編（2002）：活断層詳細デジタルマップ．60pp.，東京大学出版会．

6）小村健太朗・山下太・山田隆二・松田達生・福山英一・久保篤規・高井香里（2004）：跡津川断層ドリリング（1）－跡津川地区断層破砕帯コアと物理検層－．地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会予稿集．

7）Oshiman, N., Honkura Y., Kuge, K., and Sakai, H.（1987）: Electric and Magnetic Anormalies at the Atotsugawa Fault and Their Implications for Fault Activity. *J. Geomag. Geoelectr.*, No.**39**, 143-158.

8）Sagiya, T., Miyazaki, S., and Tada, T.（2000）: Continuous GPS array and present-day crust deformation of Japan. *Pure Appl. Geophys*. No.**157**, 2303-2322.

9）多田堯（1998）：跡津川断層における地殻変動．月刊地球，No.**20**，142-148．

10）山田隆二・ハスバートル・松田達生・小村健太朗・竹内章（2005）：跡津川断層中部で確認された断層路頭における飛騨変成岩類のフィッション・トラック年代測定，地質学雑誌（投稿中）．

11）Yamaguchi, S., Murakami, T., and Inokuchi H.（2001）: Resistivity mapping using the VLF-MT method around surface fault ruptures of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan. *The Island Arc*, No.**10**, 296-305.

（原稿受理：2005 年 4 月 8 日）

要　旨

跡津川断層のクリープ域において，VLF-MT 法による比抵抗構造探査をおこなった．同地域では，2003 年に防災科学技術研究所によって深さ 350 m までのボーリングがおこなわれている．掘削されたコアはほぼ全域で破砕され，複数の深度で断層粘土を含むすべり面が確認された．一方，掘削点から 60 m ほど南を流れる跡津川の右岸において，複数の断層露頭が発見されている．これらの断層露頭のすべり面の走向は，跡津川断層の平均的な走向（~N60°E）とは異なる方向（N30°-47°E）を示している．今回，断層露頭－掘削地点間の領域を重点的に探査した結果，10-1000 Ωm にわたる見かけ比抵抗の平面分布が得られた．短周期の空間的変動を取り出したところ，N21°-44°E の走向を持つ雁行状の比抵抗構造の存在が明らかとなり，露頭に見られる破砕帯の延長が掘削された可能性の高いことが示された．

キーワード：跡津川断層，クリープ域，雁行構造，VLF-MT，比抵抗構造