

微動アレイ探査における 地震計設置場所選定プログラムの開発

竿本 英貴¹・吉見 雅行²

¹正会員 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 (〒 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7)
E-mail: h-saomoto@aist.go.jp

²正会員 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 (〒 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7)
E-mail: yoshimi.m@aist.go.jp

地下構造を推定するための微動アレイ探査が広く実施されている。微動アレイ探査では、対象地域において地震計を(可能な限り)正三角形の頂点地点と中心地点に設置する必要がある。この地震計設置作業は、地図等を用いて対象地区の道路網上で所望の正三角形が展開できるように事前に計画しておく必要があり、計画作業には一定の労力が必要となる。この労力を削減するため、本研究では OpenStreetMap の地図データと簡単な幾何学計算によって道路網上で地震計設置位置を自動的に選定することを試みた。いくつかの地域について本プログラムを適用し、動作確認を実施するとともに今後必要となる機能について検討した。

Key Words: microtremor array exploration, OpenStreetMap, road network, hazard, geometry

1. はじめに

微動アレイ探査によって地下構造を推定する研究は、土木工学や建築学、地震学や地震工学といった様々な分野で広く行われている^{1)~3)}。一般に、微動アレイ探査時は地震計を調査対象地域で正三角形状(および重心点付近)に設置する必要があるため(図-1)、現地では探査作業を実施する前に地震計設置場所を地図等を利用して定めておく必要がある。自動車での地震計運搬や想定するアレイのサイズ等の制約のため、必然的に探査対象地域の道路網形状を確認しながら地震計設置場所を選定することになる。当然ながら、理想的な正三角形が構成できるように道路が存在していることはほとんどないため、地震計設置場所の選定には一定レベル以上の労力と試行錯誤が必要となる。このような事情から、微動アレイ探査のための地震計設置場所の候補を自動的に抽出することには一定のニーズがある。

現在、Open Database License (ODbL 1.0)⁴⁾の下でデータベース化された地理情報(道路網を含む)が、OpenStreetMap⁵⁾(以下、OSM)を通じてデジタルデータとして容易に入手することができる。これを受けて、国内外の道路網データに関する研究が様々な分野でより活発に行われつつある^{6),7)}。また、OSM データベースを容易にハンドリングするためのライブラリ(例えば OSMnx⁸⁾)も公開されている。OSM のデータを利用することで、微動アレイ探査の外接円が道路と交差する位置を単純な幾何学計算で求めることができるため、地震計設置

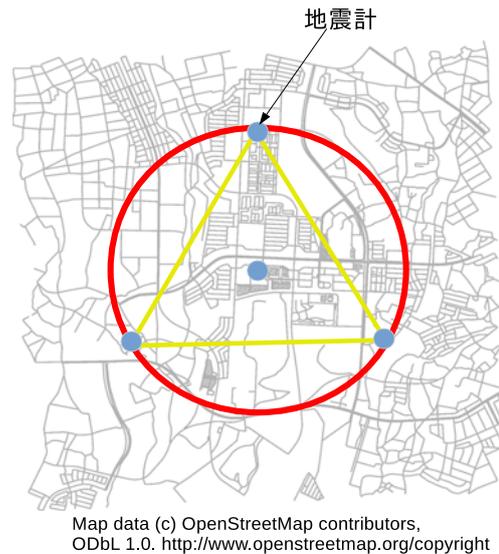
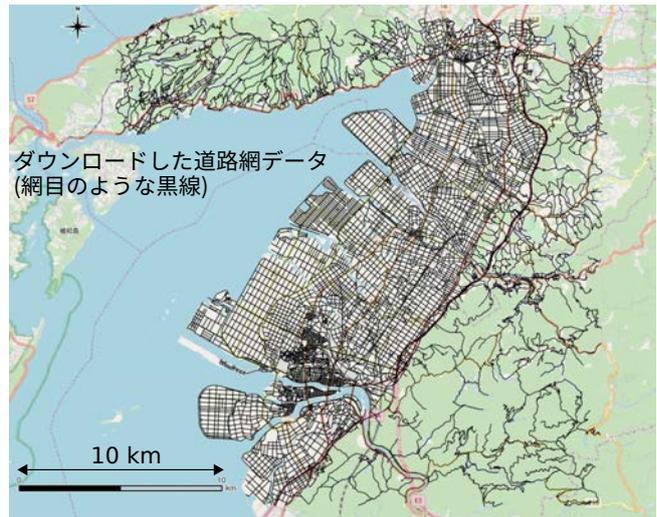
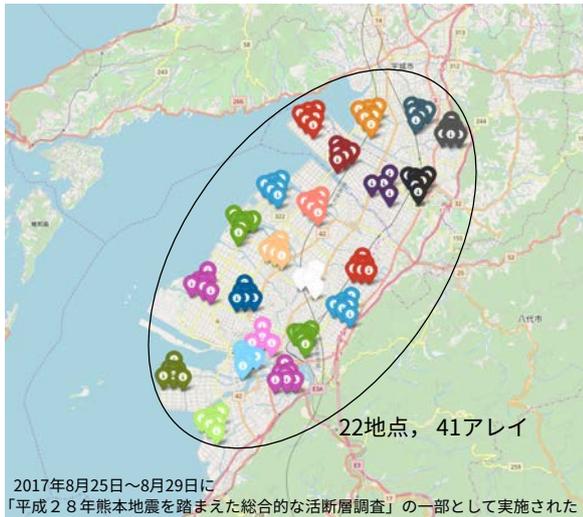


図-1 微動アレイ探査時の地震計配置例(背景の様子は約4km四方の道路網を表す)

の候補地点を座標値として抽出することが可能となる。

微動アレイ探査における地震計設置位置決定にかかる労力を削減するため、本研究では OSM のデータを用いて、道路網上に地震計設置場所についての候補地点を自動的に抽出するためのプログラムを開発した。まずは、開発したプログラムをこれまでに実施された微動アレイ探査時の地震計位置と比較し、プログラムの精度を検証するとともに、正三角形との誤差(後に定義)



地図および道路網データ：(C) OpenStreetMap contributors, ODbI 1.0. <http://www.openstreetmap.org/copyright>

図-2 平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査の一部として2017年8月下旬に実施された八代平野における微動アレイ探査のアレイ配置^{13),14)}(左図)と解析に用いる八代平野の道路網データ(右図)

がどの程度となれば、地震計設置位置を再考すべきであるのかを明らかにする。次いで、北関東の3つの地域に本プログラムを適用し、動作確認を実施するとともに今後必要となる機能について検討を加えた。

2. 地図データから地震計候補地点を選定する手続き

今回開発したプログラムによる地震計設置の候補地点の抽出は、対象地域のOSMの地図データをダウンロードから始まる。一連の手続きは以下のとおりである。

1. OSMnxライブラリ⁸⁾を用いてOSM地図データをダウンロードする。
2. ダウンロードしたshapeファイルを、GISソフト(例えばQGIS⁹⁾)で確認し、適切なEPSGコードで平面直角座標データ(またはUTM座標データ)に変換してDXF形式としてセーブする。
3. DXFファイルを読み込み、道路網データを抽出するとともに、微動アレイの外接円と交差する道路の座標(交差する道路は複数存在)を求める。
4. 求めた各交差点を用いて三角形を作成し、正三角形との誤差(後述)を評価する。
5. 誤差が最も小さい三角形(完全な正三角形ではない)の頂点の組を抽出し、これらを地震計設置地点の候補とする(得られた位置は平面直角座標、緯度・経度の両フォーマットで出力)。

手続き3から5では、DXFファイルをハンドリングするライブラリ(dxgrabber¹⁰⁾)および線分を交差判定して交点の座標を抽出することができるライブラリ(Shapely¹¹⁾)

をスクリプト言語Python¹²⁾と組み合わせることでプログラムを構築した。

3. 実際の地震計設置位置との比較に基づく許容誤差の決定

ここでは、既往の大規模な微動アレイ探査における地震計位置と本プログラムから求まる設置候補位置を比較し、プログラムの動作検証を行うとともに許容誤差について考察する。誤差(後に定義)が許容誤差より大きくなる三角形は、微動アレイ探査で用いるのは不適切と判断されるものとする。

(1) プログラム検証に用いる既往の微動アレイ探査

図-2は、「平成28年度熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査」¹³⁾の一環として実施された八代平野における微動アレイ探査(浅野ら¹⁴⁾)の一部(左図、22地点41アレイ、著者らも観測に参加)および対応する道路網データ(右図)をそれぞれ表しており、これらのデータは、今回のプログラムの検証に用いるものである。解析で用いる道路網の範囲は、八代平野のほぼ中央部(緯度:32.555524°, 経度:130.626146°)を中心とする一辺が24kmの矩形領域内とした。道路網データは、16071個のセグメントと99768個のノードから構成される。また、表-1は、図-2(左図)で示した微動アレイの半径および中心位置を参考文献¹³⁾より引用してまとめたものであり、表-1に示したデータは、プログラムへの入力データとなることに留意されたい。

表-1 図-2(左図)で示した微動アレイの半径およびアレイ中心
(参考文献^{13),14}より引用)

名称	アレイ半径 (m)	中心点の緯度 (°)	中心点の経度 (°)
A2	533, 310	32.61541	130.63046
A3	539, 255	32.58079	130.60976
A4	623, 252	32.56305	130.59084
A5	629, 261	32.53380	130.56871
B1	614, 298	32.61657	130.66472
B2	511, 256	32.59776	130.64886
B3	537, 252	32.57226	130.63297
B4	515, 258	32.55011	130.61076
B5	539, 257	32.52823	130.59276
B7	617, 257	32.48998	130.55123
C1	513, 257	32.61737	130.69307
C2	642	32.58220	130.67313
C4	514	32.53583	130.62998
C5	617	32.50656	130.60262
C6	515, 257	32.49664	130.59375
C7	617, 260	32.46546	130.57408
D1	513, 256	32.60854	130.71199
D2	616, 255	32.58320	130.69276
D3	494, 245	32.54190	130.66028
D4	599, 257	32.52261	130.65056
D5	514, 254	32.50757	130.62660
D6	604, 314	32.48835	130.61606

(2) 誤差の定義

プログラムから得られる結果を評価するために、本研究における誤差を定義しておく。微動アレイ探査では、アレイ中心に加えて正三角形状に地震計を配置することが望ましい。したがって、正三角形からのズレを評価指標として選ぶことは合理的である。

図-3に示すように、プログラムに中心点とアレイ半径を入力すれば三角形(A-B-Cの赤線)が地震計設置候補点として抽出される。これらの地点は道路網上の点として抽出され、正三角形とはなっていない。ところで、正三角形の頂点の一つが地点Aであると仮定すると、アレイ中心位置は既知であるため正三角形を構成することができる(黒線)。当然ながら、地点Bおよび地点Cでは正三角形(黒線)の頂点とのズレが生じる。地点BとCで正三角形頂点とのズレ量をそれぞれ計算し、これら2点分のズレ量の和をアレイ直径で除した無次元量を本研究における誤差と定義する。

$$\text{誤差 (\%)} = 100 \times \frac{\text{正三角形とのズレ量の和}}{\text{アレイ外接円の直径}} \quad (1)$$

道路の密度が大きければ大きいほど、地震計を設置するための三角形を数多く構成できるため、これらの中で正三角形に近いものが含まれる可能性が高くなることが期待でき、結果として正三角形との誤差が小さくなることが推察できる。また、アレイの半径を大きくすればするほど、アレイ領域内に含まれる道路の数が増加して三角形の候補が多くなる上、ズレ量に比してアレイ直径が十分大きくなることが考えられるため、結果として誤差が小さくなることが期待できる。言い換

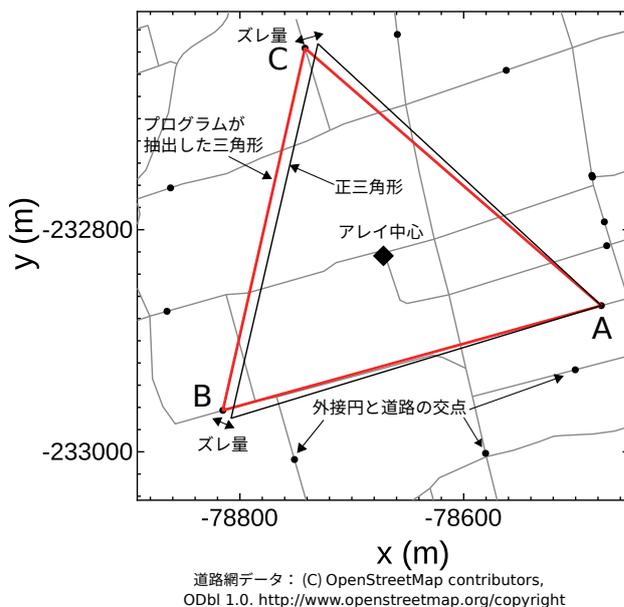


図-3 本研究における誤差の定義を説明するための図

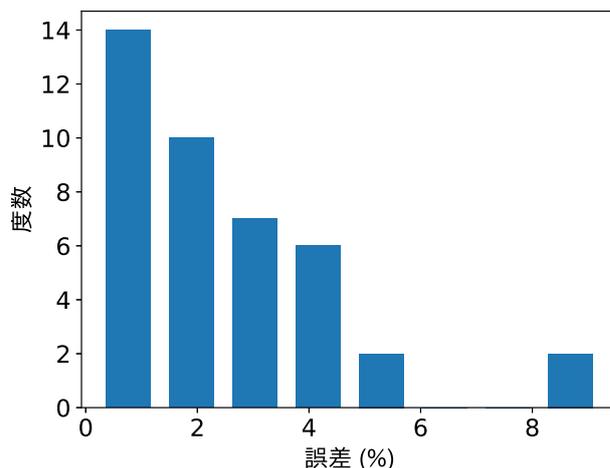


図-4 表-1のデータをプログラムに入力して得られた三角形(41アレイ分)に対する誤差(式(1))の頻度分布

えれば、都市部で大きなアレイ探査を実施する場合に誤差が小さくなることが期待できる。

微動アレイ探査の精度を一定以上に保つという観点から、ここで定義される誤差がどの程度以上となれば、地震計の配置を再考する必要があるのかを把握しておくことは極めて重要である。以下では八代平野で地震計が実際に設置された地点とプログラムが抽出した地震計候補地点を比較することで、許容誤差を決定する。

(3) 動作検証および許容誤差の決定

図-4は、表-1で示したアレイ半径およびアレイ中心位置をプログラムに入力することで得られた三角形(全41アレイ分)について、式(1)で定義した誤差を計算し

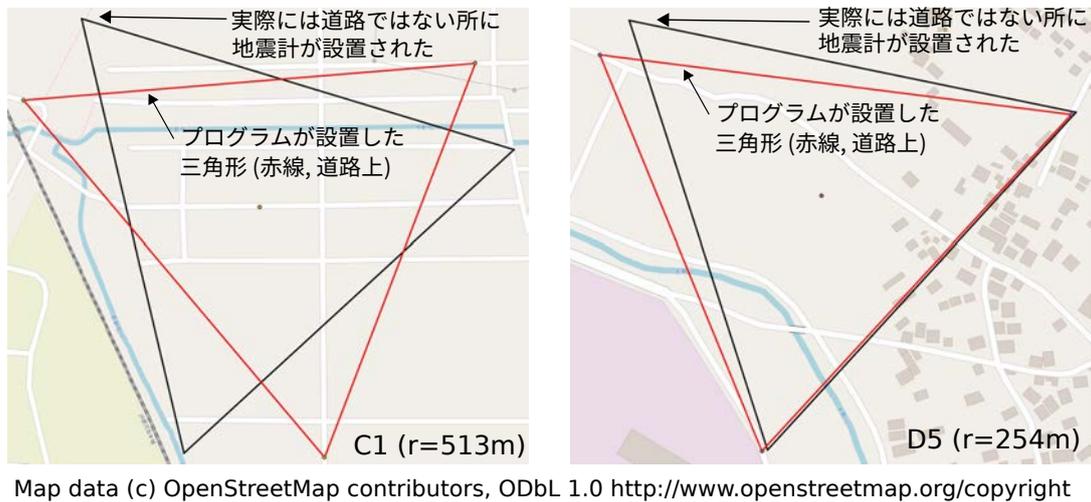


図-5 プログラムが設定した三角形 (誤差 8%超のケース: C1(r=513m), D5(r=254m)) と実際の地震計設置位置

て頻度分布 (横軸: 誤差, 縦軸: 度数, ビン数: 8) を描いた結果である。頻度分布より, ほとんどのケースについて誤差が 5%以内となっていることが確認できる。

誤差が 8%よりも大きなケースは C1(アレイ半径 513m) のアレイおよび D5(アレイ半径 254m) の 2 ケースであるが, これらについてプログラムが設定した三角形を示したものが図-5 である。いずれのケースについても, 誤差が大きくなる要因として, 道路の数が十分ではないことが挙げられる。図-5 には, 実際に地震計が設置された位置 (黒線の三角形) も併せて示しているが, 道路上のみではアレイ観測に適した三角形が構成できないと判断されており, 三角形の頂点のいずれかは道路以外の位置にセットされていることが確認できる。

アレイの半径 (あるいは直径) が大きければ大きいほど, アレイ外接円が道路と交差する数が増加するため, 誤差が小さくなることが期待できる。アレイ直径と誤差についての関係を確認するため, 横軸にアレイ直径を, 縦軸に誤差をプロットしたものが図-6 である。図-6 ではアレイ直径が 1000m を超える場合において誤差が 1%以下となるケースが, アレイ直径が 500m 程度の場合に比べて数多く認められる。この結果から, 上述の推察のとおり, アレイ直径が大きくなればなるほど誤差が小さく可能性が大きくなることが示唆される。

図-7 および図-8 は, 本プログラムが算出した三角形 (赤線) と, 実際の微動アレイ探査で地震計が設置された位置 (黒線の三角形頂点位置) の比較を地点毎に行ったもので, 各図には式 (1) で表される正三角形との誤差も併せて示している。まず, プログラムが算出した候補地点と実際に地震計が設置された地点がほぼ同じと思われる箇所は 24/41 であった。図-7 および図-8 で示した地点名で挙げれば, A2 地点, A3 地点, A4 地点 (小ア

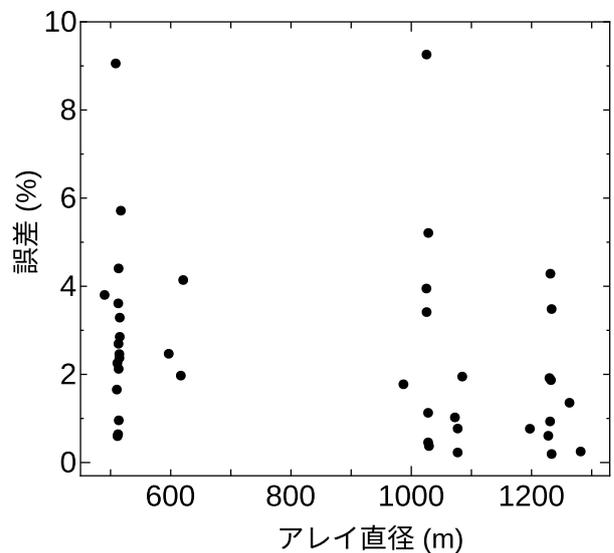
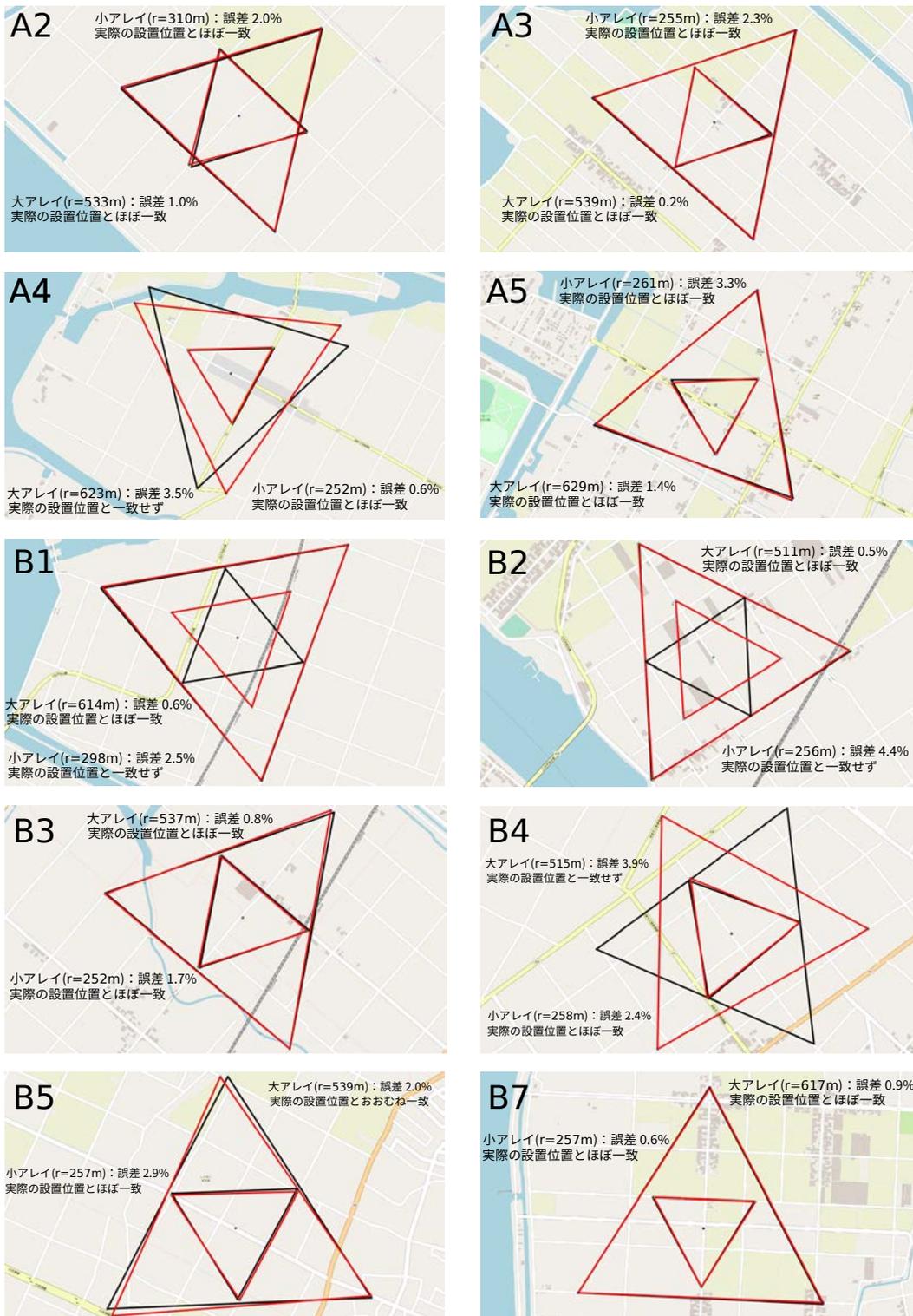


図-6 算出した誤差とアレイ直径の関係性について

レイ), A5 地点, B1 地点 (大アレイ), B2 地点 (大アレイ), B3 地点, B4 地点 (小アレイ), B5 地点 (小アレイ), B7 地点, C1 地点 (小アレイ), C2 地点, C6 地点 (小アレイ), C7 地点 (小アレイ), D1 地点 (小アレイ), D2 地点 (小アレイ), D3 地点 (小アレイ), D4 地点となる。半数以上のアレイで本プログラムが算出した地震計設置候補地点が実際に使用されていたことになる。これら 24 アレイに対する正三角形との誤差 (式 (1)) は, ほとんどの場合において 2%台以下となっていることが特徴である。したがって, 誤差 2%台として得られた地震計設置候補地点は, 道路幅が極端に狭い等の交通事情に起因する特殊なケースを除けば, 地震計設置位置として採用して差し支えないと考える。

本節の主題である, 許容誤差をどの程度と設定する

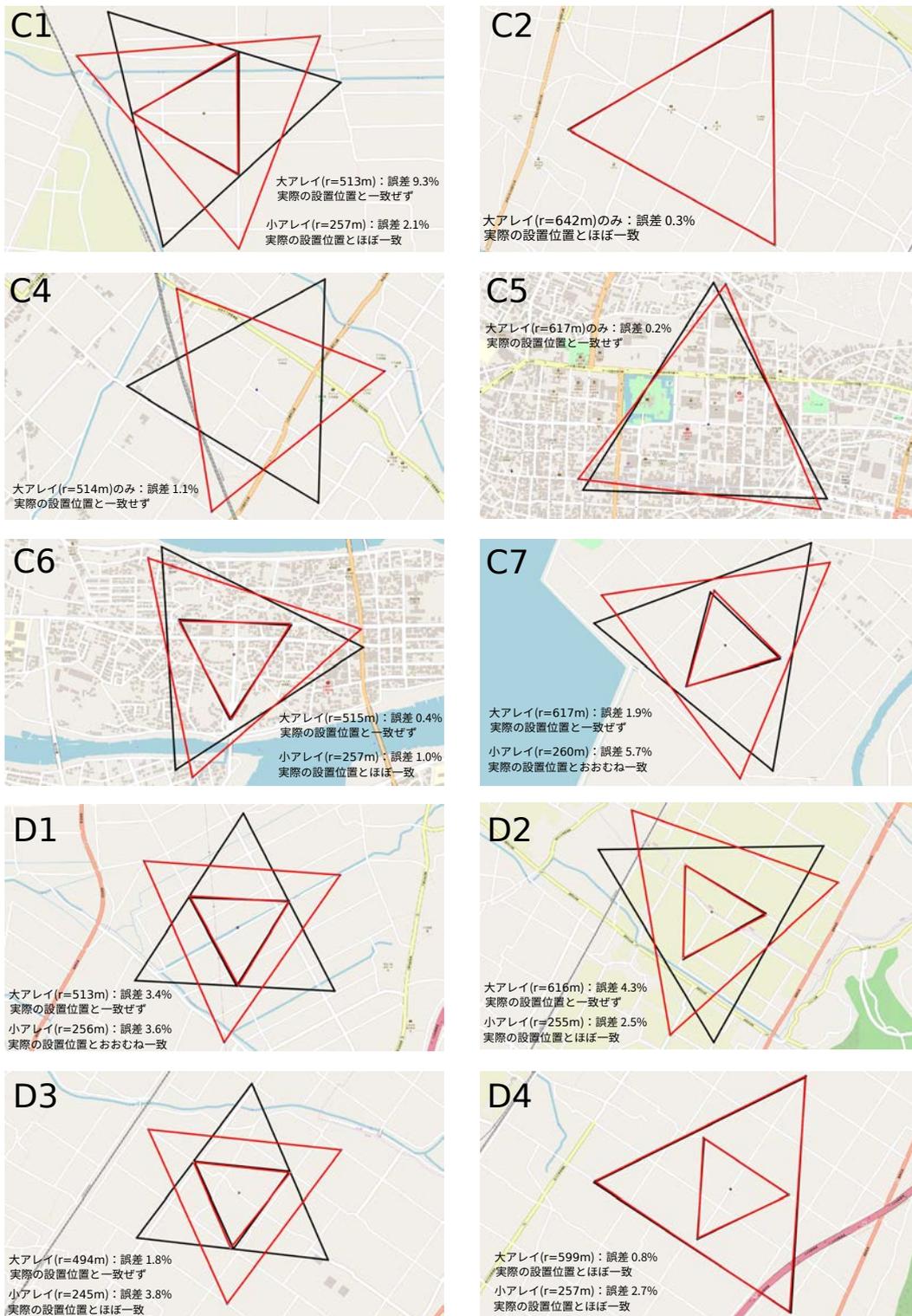


Mapdata (c) OpenStreetMap contributors, ODbI 1.0. <http://www.openstreetmap.org/copyright>

図-7 プログラムが算出した三角形(赤線)と実際に地震計が設置された三角形(黒線)の比較(A2地点からB7地点について)

のかについては、A4地点(大アレイ)、D1地点(小アレイ)、D3地点(小アレイ)の設置事例を元に推察する。A4地点(大アレイ)に対してプログラムが算出した候補地点からなる三角形の誤差は、3.5%である。ところが、実際の地震計設置場所はプログラムが算出した結果と

異なっている。一方で、D1地点(小アレイ)とD3地点(小アレイ)は、プログラムが算出した地点に近い場所に地震計が設置されているが、これらに対する(プログラムが算出した)三角形の誤差はそれぞれ3.6%および3.8%である。これらの結果から、仮に誤差が3.5%程



Mapdata (c) OpenStreetMap contributors, ODbI 1.0. <http://www.openstreetmap.org/copyright>

図-8 プログラムが算出した三角形 (赤線) と実際に地震計が設置された三角形 (黒線) の比較 (C1 地点から D4 地点について)

度となった場合、他により良い候補地点が設定できる場合は変更を検討し、他に良い候補が見当たらない場合は誤差 4%以内であればそのまま利用していることが推察できる。以上の検討から、式 (1) で表される誤差の許容誤差を 3.5%と設定することで、地震計設置位置に

関して既往の研究と同程度の条件となると考える。

ところで、交通事情が反映されているのは図-8 の C5 地点である。C5 地点で本プログラムが算出した三角形 (赤線) は、実際の地震計設置位置からなる三角形 (黒線) よりも正三角形に近い。しかしながら、C5 地点の紙面

表-2 各地域のアレイ中心位置 (緯度経度) とアレイ外接円直径

地域名	(緯度, 経度) (°)	アレイ外接円直径 (m)
茨城県水戸市	(36.095288, 140.065239)	200, 400, 600, 800, 1000
栃木県宇都宮市	(36.561681, 139.887371)	200, 400, 600, 800, 1000
群馬県前橋市	(36.095288, 140.065239)	200, 400, 600, 800, 1000

向かって右側の頂点は道路幅が広い道路に沿って設定されており、地震計の可搬性を高める目的でこのように設置されている。今回用いた OSM の道路網データには道路幅に関する情報は導入されていないため、このような交通事情を考慮することは困難であり、この点については今後の課題となる。また、C5 地点は他の地点に比べて道路網密度が大きく、今回実施した 41 アレイに対する解析の中で交差判定処理の回数が最も多くなる地点である。計算時間の観点からは、道路網データ (16071 セグメント, 99768 ノード) の読み込みも含め、C5 地点の三角形を抽出するまでの時間は約 2.5 秒であり、十分実用に耐え得ることを確認している。なお、計算時間の内訳は、道路網データの読み込み約 1 秒、交差判定処理約 1.5 秒であった (CPU: Intel Core i9-9900K)。

以上、既往の研究で用いられた微動アレイ探索位置と本プログラムから得られる地震計設置候補位置を比較した結果、本研究で定義する誤差を 3.5% 程度以内とすることで、微動アレイ探索に用いることができる地震計設置位置を得ることができると考える。また、解析時間についても十分実用的であることを確認した。

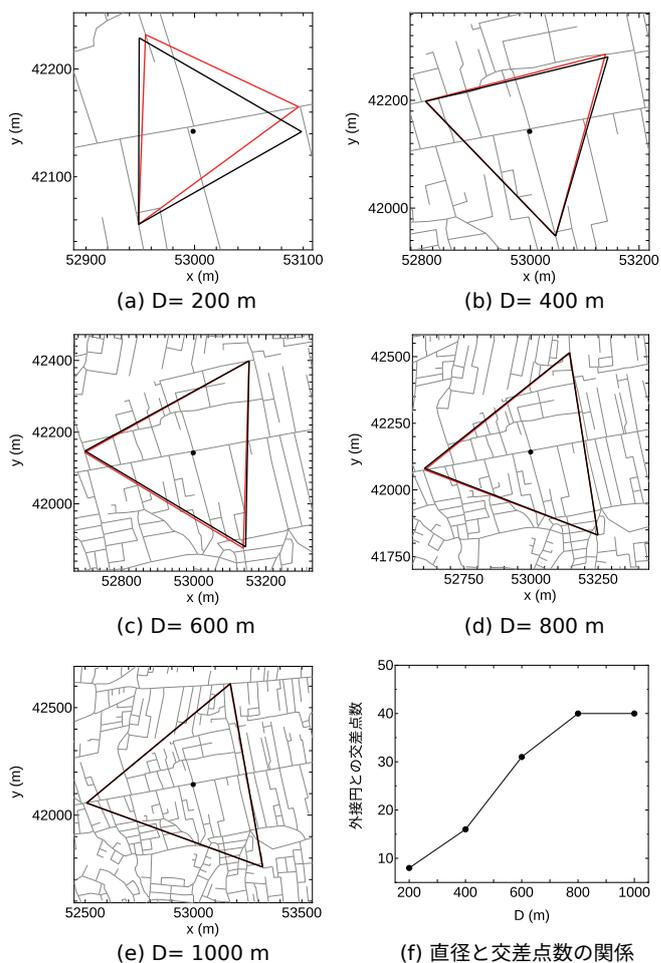
4. プログラム適用例

ここでは、作成したプログラムを北関東の 3 つの地域に適用し、八代平野以外の地域においても意図したおりに動作するかどうかを確認する。当然ながら、結果は対象地域の道路網事情に強く依存するため、あまりにも道路密度が小さい地域へ本プログラムを適用することは難しい。

今回の対象地域は、一定レベル以上の道路密度を有する地域として、「茨城県水戸市 (人口約 27 万人)」、「栃木県宇都宮市 (人口約 52 万人)」、「群馬県前橋市 (人口約 33 万人)」の都市部 3 地点とした。なお、これらの地域に対する平面直角座標系は同じ (EPSG:2451) である。各地点で想定している微動アレイの中心地点の緯度・経度およびアレイ外接円の直径を表-2 に示す。

(1) 茨城県水戸市への適用例

図-9 は、茨城県水戸市に微動アレイを展開することを想定し、開発したプログラムによって地震計設置位置の候補地点を抽出した結果を示している。図-9(a) から図-9(e) は、微動アレイの外接円直径毎に結果を示し



道路網データ: (c) OpenStreetMap contributors, ODbI 1.0., <http://www.openstreetmap.org/copyright>

図-9 水戸市における地震計設置候補の抽出例 ((a) から (e) について黒線: 正三角形, 赤線: 抽出した候補地点)

たもので、図-9(f) は外接円と道路の交差点数と外接円直径 D の関係を示している。図-9(a) から図-9(e) で、赤線の三角形はプログラムによって抽出された正三角形を、黒線の三角形は正三角形をそれぞれ示している (続く図-10, 図-11 でも共通)。

外接円直径 D が 200m の場合では、正三角形からのずれが大きくなっているが、この結果は道路との交点が少ないことに起因している。誤差については、後に他地域と併せて示すが、D=200m の場合のみが極端に大きく、正三角形とのズレが目視においても確認できる。一方、D≥400m の各ケースでは、プログラムから算出された三角形と正三角形は、目視の上ではほぼ一致していることがわかる。図-9(f) の外接円と円と交差する道路数の関係から、交差点数が 40 程度で飽和することがわかる。この傾向は、大都市を除く場合にしばしば確認できる。例えば、茨城県つくば市に対する事例でも D=1000m で交差点数が約 40 程度で飽和した¹⁵⁾。

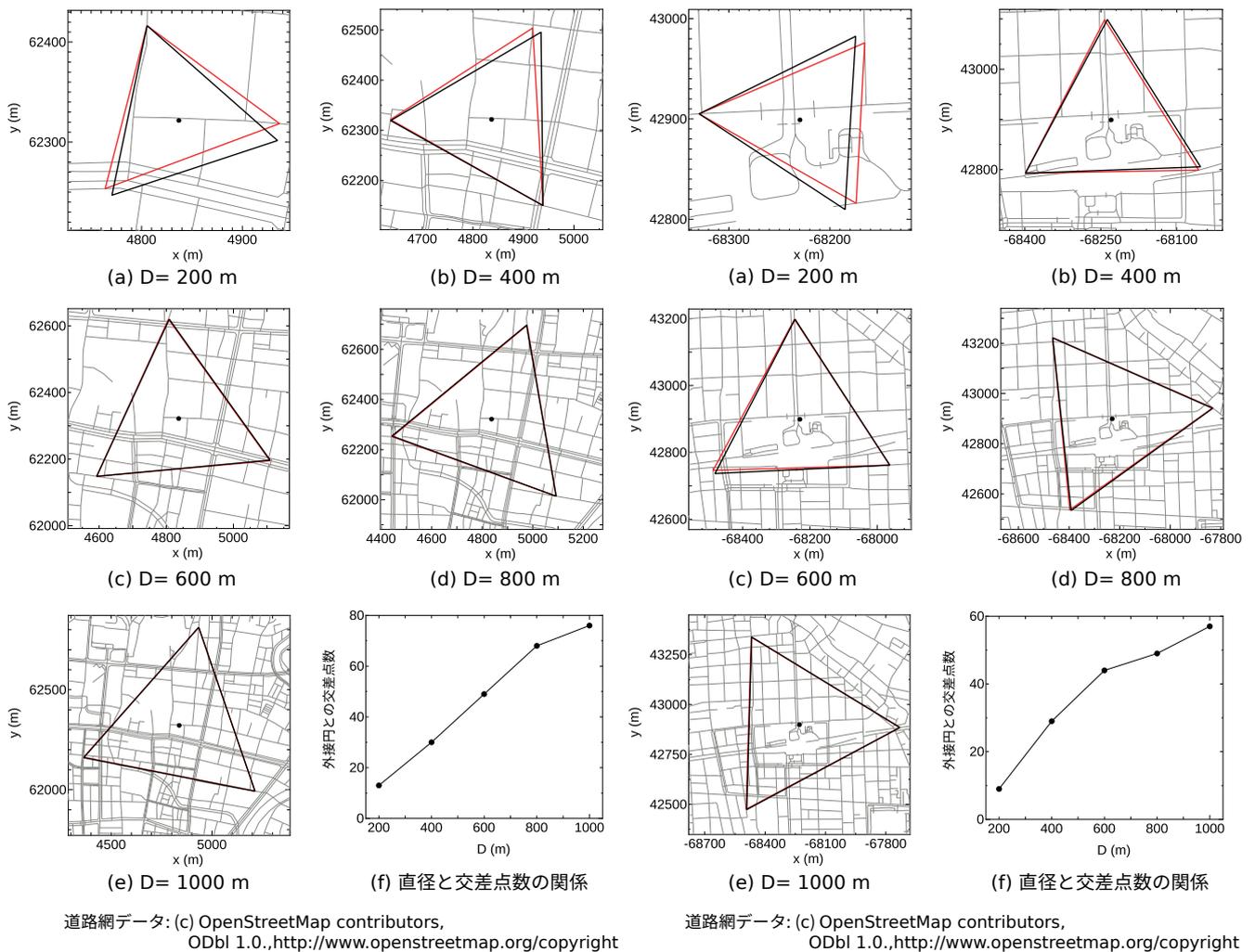


図-10 宇都宮市における地震計設置候補の抽出例 ((a) から (e) について黒線：正三角形，赤線：抽出した候補地点)

図-11 前橋市における地震計設置候補の抽出例 ((a) から (e) について黒線：正三角形，赤線：抽出した候補地点)

(2) 栃木県宇都宮市への適用例

図-10は、栃木県宇都宮市に微動アレイを展開することを想定し、開発したプログラムによって地震計設置位置の候補地点を抽出した結果を示している。図-10(a)から図-10(e)は、微動アレイの外接円直径毎に結果を示したもので、図-10(f)は外接円と道路の交差点数と外接円直径の関係を示している。

外接円直径が200mおよび400mの各ケースでは、水戸市でのケースと同様に、Dが小さい場合は道路密度が十分ではないため、正三角形とのズレが目視によって確認できる。一方、 $D \geq 600\text{m}$ のケースについては、目視の上ではほぼ正三角形に近い三角形が抽出されることがわかる。図-10(f)では、水戸市のケースのように飽和することなく、Dが大きくなるにつれて交差点数も増加し続けている。この傾向は、道路網が発達した都市部で確認できるものであり、別途実施した名古屋市での事例¹⁵⁾でもこの傾向が確認できる。

(3) 群馬県前橋市への適用例

図-11は、群馬県前橋市に微動アレイを展開することを想定し、開発したプログラムによって地震計設置位置の候補地点を抽出した結果を示している。図-11(a)から図-11(e)は、微動アレイの外接円直径毎に結果を示したもので、図-11(f)は外接円と道路の交差点数と外接円直径の関係を示している。この対象点は格子状に道路が整備されているのが特徴である。

外接円直径が200mのケースでは、水戸市や宇都宮市でのケースと同様に正三角形とのズレが目視によって確認できる。一方、 $D \geq 400\text{m}$ のケースについては、目視の上ではほぼ正三角形に近い三角形が抽出されることがわかる。図-10(f)では、宇都宮市のケースのように飽和することなく、Dが大きくなるにつれて交差点数も増加し続けている。この傾向は、道路網が発達した都市部で確認できるものであり、別途実施した名古屋市での事例¹⁵⁾でもこの傾向が確認できる。

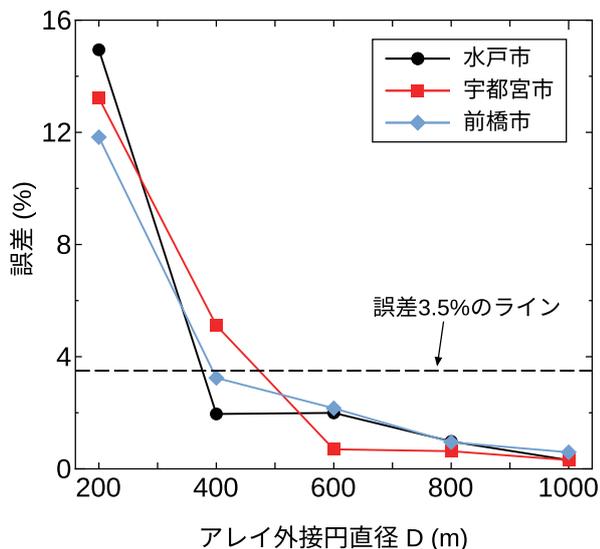


図-12 各地域に対する誤差とアレイ直径の関係

(4) 各地域に対する誤差について

図-12は、水戸市、宇都宮市、前橋市の各ケースについて誤差とアレイ外接円直径 D の関係を示したものである。

アレイ直径 D が 600m より大きい場合は、都市によらず誤差が 2% 以内となっており、既往の研究との比較によって定めた許容誤差 (3.5%) 以内である。特にアレイ直径が 800m より大きい場合は、どの都市についても誤差が 1% 以内となっており、極めて高い精度で正三角形に近い三角形が抽出されている。

一方、 D が 400m より小さい場合は、道路密度が小さいために、誤差を許容誤差以内にはできない。以上の検討から、本プログラムは、一定レベル以上の道路密度を有する都市部における微動アレイ探査で、アレイ外接円直径が 400m 程度以上となるケースにおいて有効であると考えられる。

5. 今後付与すべき機能について

これまでの検討において微動アレイ中心点座標とアレイの半径を入力すれば、プログラムは道路網上の地震計設置候補地点を一定以上の精度で抽出できることを確認してきた。したがって、上記データの入力後のプログラムの動作については現時点では改善の余地は少ないと考える。

一方、ユーザが準備するアレイ中心点座標はアレイの数が少ない場合はあまり時間がかからないが、アレイの数が多ければ準備に一定レベル以上の労力がかかる。この入力データ作成作業を容易にするための機能が今後必要であると考えられる。例えば、GUI を用いて

地図画像をクリックすることでその地点の緯度・経度をリストに追加・出力するプログラムや、指定した緯度・経度の範囲内に格子状に中心点を自動的に設置してそのリストを作成するプログラム等が挙げられる。

これらの他、道路網の交通事情に関する課題も確認できた。一般に、交通量は時刻とともに変化するため、定量的に評価し対処するのは困難である。したがって、本プログラムにおいて道路網の交通事情に関連する実装は行わない予定である。

6. まとめ

OpenStreetMap の道路網データを用いて、微動アレイ探査における地震計設置位置の候補地点を自動的に抽出する支援プログラムを開発した。すでに実施された微動アレイ観測における地震計設置位置とプログラムが抽出した地震計位置の比較を行い、精度を検証するとともに許容誤差を決定した。ついで、プログラムを道路網が発達した 3 つの地域に適用し、動作確認を行った。今回の検討を通じて得られた知見は、以下のとおりである。

1. 既往の微動アレイ探査で用いられた地震計設置位置との比較を行い、許容誤差は 3.5% が妥当であると判断した。
2. 人口が 30 万人程度以上の都市に本プログラムを適用すると、微動アレイ外接円直径が 400m 程度以上であれば、十分な精度で地震計設置位置の候補を抽出することが期待できる。
3. 計算時間は数秒程度であり、十分実用に耐え得る。
4. 今後付与すべき機能について検討した結果、アレイの中心点座標データ作成を容易にするための機能が必要と考える。

今後は本論文で検討した付与すべき機能を実装し、ユーザビリティの向上を目指す。

参考文献

- 1) 吉見雅行, 吉田邦一, 関口春子, 堀川晴央, 竿本英貴, 松浦旅人: 微動アレイ探査で推定した大分平野の S 波速度構造, 活断層・古地震研究報告, No.8, pp.295-315, 2008.
- 2) Cho, I., Tada, T. and Shinozaki, Y.: A generic formulation for microtremor exploration methods using three-component records from a circular array, *Geophys. J. Int.*, Vol.165, pp.236-258, 2006.
- 3) 紺野克昭, 鈴木貴博, 鎌田泰広, 長尾 毅: 横浜市高密度強震ネットワーク観測点における微動を用いた地盤の平均 S 波速度の推定, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.639-654, 2007.
- 4) Open Database License のウェブサイト: <https://opendatacommons.org/licenses/odbl/1.0/> (2018 年 10 月 17 日 閲覧)
- 5) OpenStreetMap のウェブサイト: <https://www.openstreetmap.org/> (2018 年 10 月 17 日 閲覧)
- 6) Zhang, Y., X., Li, Wang, A., Bao, T. and Tian, S.: Density

- and diversity of OpenStreetMap road networks in China, *Journal of Urban Management*, Vol.4, No.2, pp.135–146, 2015.
- 7) 小野祐輔, 本郷峻介: OpenStreetMap を利用した中山間地の地震時孤立可能性の定量化, 第 37 回地震工学研究発表会, D11-1212, 2017.
 - 8) Boeing, G.: OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.65, pp.126–139, 2017.
 - 9) QGIS のウェブサイト: <https://www.qgis.org/ja/site/> (2018 年 10 月 18 日 閲覧)
 - 10) dxfgripper のウェブサイト: <https://pypi.org/project/dxfgrabber/> (2018 年 10 月 18 日 閲覧)
 - 11) Gillies, S. et al.: Shapely: manipulation and analysis of geometric objects, <https://github.com/Toblerity/Shapely> (2018 年 10 月 18 日 閲覧)
 - 12) Python Software Foundation: Python Language Reference, <http://www.python.org> (2018 年 10 月 18 日 閲覧)
 - 13) 地震調査研究推進本部: 平成 28 年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査 平成 29 年度成果報告書, pp.304–315, 2018.
 - 14) 浅野公之, 吉見雅行, 岩田知孝, 神野達夫, 是永将宏, 竿本英貴, 重藤迪子, 地元孝輔, 津野靖士, 長嶋史明, 松島信一, 三宅弘恵, 山田伸之, 山中浩明, 杉山長志: 八代平野における微動アレイ探査, 日本地球惑星科学連合 2018 大会, SSS14-10, 2018.
 - 15) 竿本英貴, 吉見雅行: 微動アレイ探査における地震計設置場所選定プログラムの開発, 第 9 回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集, pp.133–137, 2019.

DEVELOPING SUPPORTIVE PROGRAM FOR LOCATION SETTING OF SEISMOMETERS IN MICROTREMOR ARRAY EXPLORATION

Hidetaka SAOMOTO and Masayuki YOSHIMI

The microtremor array exploration is a technique to infer the characteristics of wave velocity structures for the underground and is widely used in both academic and engineering fields mostly relating to the earthquake hazard mitigation. Although the exploration is useful, it requires a certain amount of effort during the advance planning for location settings of seismometers due to the complex shape of the road network. We have thus developed a supportive program to reduce the effort using map data on the internet provided from the OpenStreetMap foundation. By applying the program to several regions, we confirmed that the program successfully extracted the possible locations where the seismometers should be set. The allowable error, which is defined by the deviation measured from a regular triangle, was estimated to be 3.5% from the comparison with the previous study on microtremor array exploration.