

レベルクロス法と振幅比を利用したエアガンシグナルの識別法

Identification for Airgun Signal by Level-Cross Method and Amplitude Ratio

高橋 諒¹, 森脇 健²
TAKAHASHI Ryo¹, MORIWAKI Ken²

(Received May 21, 2021; Accepted February 16, 2022)

1 はじめに

エアガンを用いた構造探査の実施時に、周辺の海底地震計でそのシグナルが記録される。緊急地震速報の処理に活用している国立研究開発法人防災科学技術研究所の DONET (Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis) や S-net (Seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench) で記録されたエアガンシグナルの一部は、緊急地震速報の処理に導入されている多項目のノイズ識別処理 (気象庁, 2020) をくぐり抜け、地震トリガとして中枢処理に入力される。そのため、エアガンシグナルと地震によるトリガデータを同一地震として処理した場合には、緊急地震速報の過大警報につながる可能性は排除できない。Tamaribuchi et al. (2021) はエアガンの発振間隔がほぼ一定で、そのシグナルが似ていることに着目し、自己相関を用いてエアガンシグナルを識別することに成功している。この手法は自己相関を用いているため、高精度でエアガンシグナルを識別することが可能であるが、やや計算負荷が大きい。そのため、1 秒以下の極めて高い即時性を求められる緊急地震速報の処理への適用が難しい。そこで本稿では、即時解析に適した、簡便で計算負荷の小さいエアガンシグナルの識別手法として、振幅を考慮したゼロクロス法 (レベルクロス法) を用いた手法を考案し、過去のエアガンによる構造探査事例に適用して検証を行った。

2 手法

レベルクロス法とは、ある時系列データに対して、

ゼロ線に一定の幅を持たせたゼロゾーンを横切る回数をカウントする手法で、一定以上の振幅レベルで周波数を推定する際に有効な方法である。エアガンシグナルの識別法としてレベルクロス法に着目した理由は、エアガンシグナルの多くが波形の立ち上がり付近に高周波卓越部分を持つという特徴があるからである。高周波数成分が卓越する波形は短い時間に多くのレベルクロスがあると考えられることから、エアガンシグナルの識別の閾値として使うことを考えた。具体的な手順は、以下のとおりである。

海底地震計の 3 成分全てのオフセット調整後の加速度データを入力値として、以下の処理を成分毎に行う。

時刻 t における加速度データ $Acc(t)$ が時刻 t_0-t_a から時刻 t_0 の間に

$$Acc(t) \geq L \quad (1)$$

$$Acc(t) \leq -L \quad (2)$$

を「交互に」満たした回数 (レベルクロス回数) を記録する。ここで t_0 は判定基準時刻、 t_a は判定区間長、 L はカウントレベルの基準値である。この L を適切に設定することにより、一定以上の加速度振幅を持つシグナルのみを検出するということになるので、定常ノイズをシグナルとして検出することを排除できる。例えば図 1 のような波形の場合、図中の a, b のタイミングでは(1)式は満たしているが、(2)式と「交互に」満たしていないため 1 回とカウントしない。一方、図中の A~E では(1)式と(2)式を「交互に」満たしているため 1 回とカウントする。図 1 の判定区間におけるレベ

¹ 地震火山部地震火山技術・調査課, Earthquake and Volcanic Engineering Affairs Division, Seismology and Volcanology Department

* 現所属: 地震火山部管理課, Administration Division, Seismology and Volcanology Department

² 地震火山部地震火山技術・調査課, Earthquake and Volcanic Engineering Affairs Division, Seismology and Volcanology Department

ルクロス回数は 5 回である。

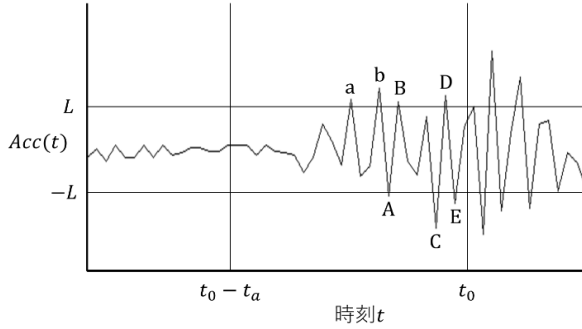


図 1 レベルクロス回数の概念図

エアガンシグナルであると判定するために、レベルクロス回数が閾値 N_{cr} 以上に達した場合に、該当成分において以下の値を計算する。これは、地震波形において高周波数成分が卓越しやすい P 相後続部分を誤ってエアガンシグナルと判定することを避けるための手順である。

$$Amp = \sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} |Acc(t)| \quad (3)$$

$$Amp' = \sum_{t=t_0-2t_a}^{t_0-t_a} |Acc(t)| \quad (4)$$

ここで、 Amp は時刻 t_0-t_a から時刻 t_0 における加速度振幅絶対値合計であり、 Amp' は時刻 t_0-2t_a から時刻 t_0-t_a における加速度振幅絶対値合計である。これらの値を使って、シグナルの立ち上がりの振幅比 A_{rat} を次のように計算する。

$$A_{rat} = \frac{Amp}{Amp'} \geq R \rightarrow Airgun \ signal \quad (5)$$

レベルクロス法で検出した高周波シグナルが、エアガンシグナルの先頭付近であれば A_{rat} は 1 を大きく上回り、P 相後続部分であれば A_{rat} が 1 を大きく上回る可能性は低い。

本手法では、3 成分のいずれかでレベルクロス回数が N_{cr} 以上に達し、かつ、立ち上がり振幅比 A_{rat} が閾値 R 以上となった場合、該当波形をエアガンシグナル

と判定する。

3 検証結果と考察

2018 年から 2020 年にかけて実施された 5 つのエアガンによる構造探査事例に本手法を適用し、識別が正しく行われるかどうかを検証した結果を表 1 に示す。検証は、図 2 に示す、エアガンシグナルを多数記録した観測点において実施した。検証時に使用したパラメータ値は S-net 観測点で $t_a=0.14$ (秒), $N_{cr}=6$ (回), $L=3$ (digit 値), $R=4$, DONET 観測点で $t_a=0.2$ (秒), $N_{cr}=10$ (回), $L=20$ (digit 値), $R=4$ である。これらの値は、実際に観測されたエアガンシグナルの特徴を考慮し、微調整を加えながら決定した。各観測点におけるトリガデータは、上下動成分の振幅に基づいて、各地震や各エアガンシグナルにおいて 1 つ作成される。ここでは、緊急地震速報の観測点側の処理に導入されているノイズ識別手法でノイズと判定されず、地震データとして中枢へ入力されたデータのうち、気象庁一元化カタログ掲載の地震と紐づかなかったトリガデータのみを検証対象としている。それらの対象トリガのうち、本手法を用いることでエアガンシグナルであると検知できたデータの割合を計算した。エアガンシグナルの検出は、S-net 敷設領域での調査船「かいめい」による探査時 (85.3%) を除いて概ね 95% 程度であった。観測網や調査船の種類により、結果に多少の差異はあるものの、概ね本手法が有効であることが分かった。

一方、本手法は観測波形の高周波成分の卓越具合を判定するものであることから、高周波成分の卓越した地震波形の一部分を誤ってエアガンと判定する場合もあり得る。そこで 2019 年 1 月から 2020 年 9 月に発生したマグニチュード 3 以上の地震波形に本手法を適用した (表 2, 3)。短期間で効率よく検証を行うため、分布に偏りが無いよう選別した観測点 (図 3) を使用した。なお、気象庁一元化カタログに掲載されたイベントを地震とし、対象イベントの波形を各観測点においてどの程度エアガンシグナルと判別するかを検証した。その結果、全波形のうち、DONET では 4.3% (9/209), S-net では 9.2% (149/1613) の地震波形をエアガンシグナルと判定した。また、マグニチュードの大きさによる誤検知率 (表 3) を見ると、規模の大きな地震ほど誤検知率が低下していることが分かる。これは、マグニチュードが大きくなるにつれて高周波成分が卓越しにくくなるため、地震波形を誤ってエアガ

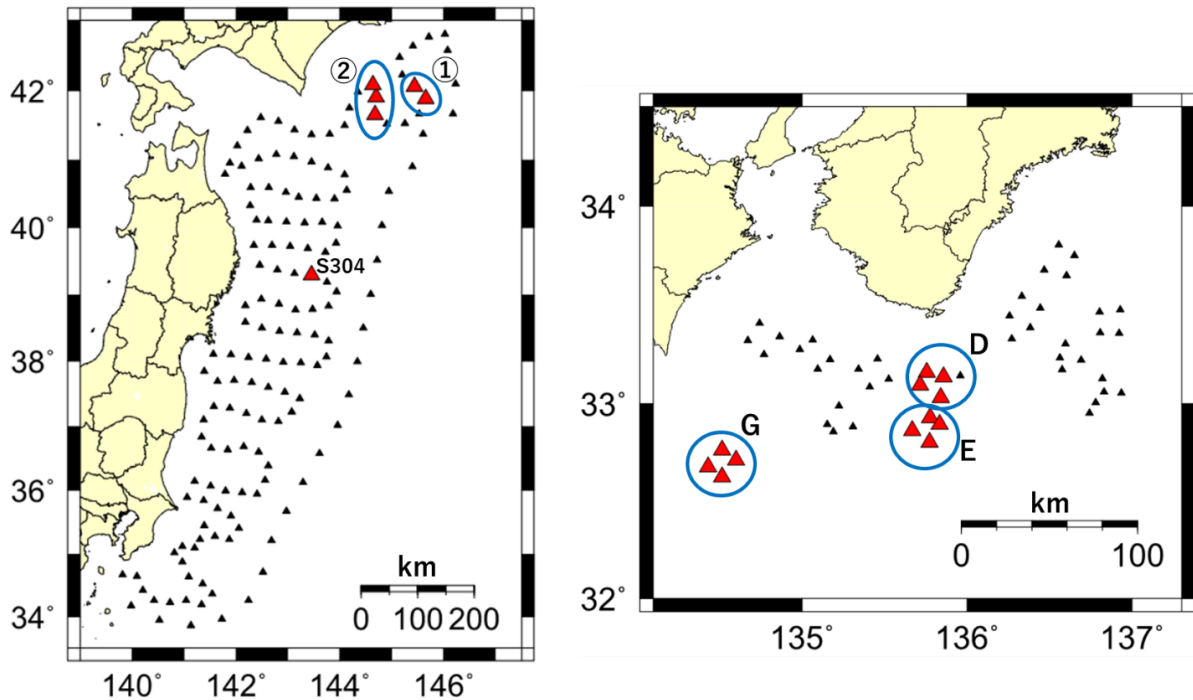


図2 エアガン波形での検証に使用した観測点

S-net (左図) 及び DONET (右図) の観測点 (黒三角) のうち、本稿におけるエアガン波形での検証に使用した観測点を赤三角で示す. 左図中の①は S505, S506 を, ②は S510, S511, S512 を示し, 右図中の D, E, G は DONET2 の D ノード, E ノード, G ノードを示す. なお, D ノードにおける障害中の 1 観測点は対象外とした.

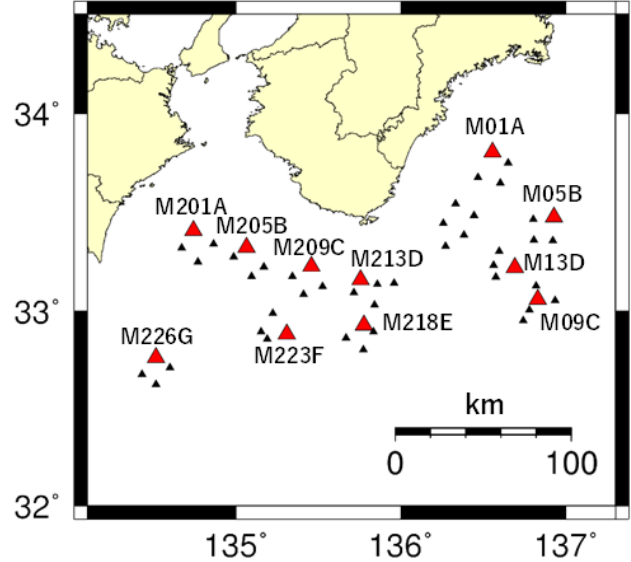
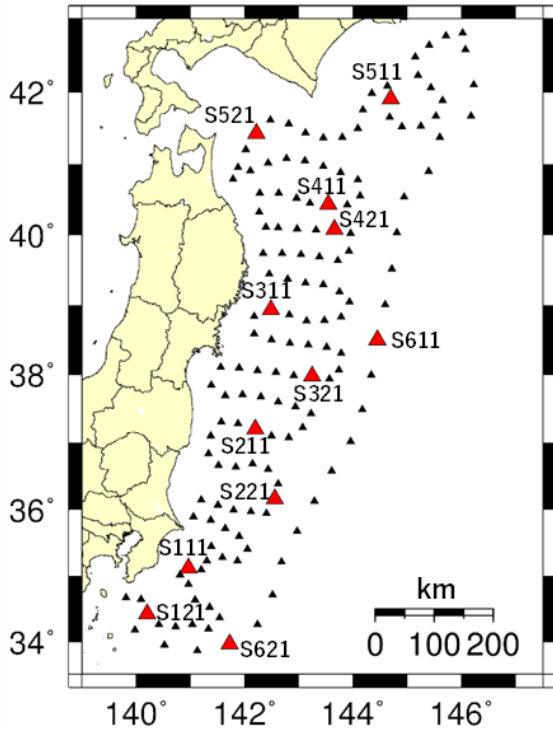
表1 エアガンによる構造探査事例における検証結果

探査事例	DONET 「かいめい」	S-net 「かいれい」	DONET 「かいれい」	S-net 「かいめい」	S-net 「白鳳丸」
解析対象期間	2018/12/14~16	2019/9/6~7	2020/1/10~11	2020/10/8~10	2020/11/5
対象観測点	DONET2 D,E ノード	S-net S505,S506	DONET2 G ノード	S-net S510,S511,S512	S-net S304
対象トリガ数	3129	504	1161	760	17
検知トリガ数	3011	482	1027	648	17
検知率	96.2%	95.6%	93.7%	85.3%	100.0%

ンシグナルと判定する可能性が低くなるためであると考えられる.

本手法を緊急地震速報の処理へ適用した場合, エアガンシグナルによる過大警報のリスク減少が期待される. 緊急地震速報の処理におけるエアガンシグナルに伴う過大警報が生じ得るケースとしては, 先にエアガンシグナルによるトリガデータが地震トリガとして入力され震源を決定したのち, 少し遅れて入力され

たやや遠い場所で発生した地震のトリガデータが先に決定した震源と理論走時が概ね一致したため1つの地震として処理された結果, 実際よりも大きな地震が発生したと誤って判断してしまうケースがある. このため, エアガンシグナルが地震によるトリガデータとして緊急地震速報の中核処理に入力される機会を, 本手法により高い精度で適切に除外することで, エアガンシグナルによる過大警報のリスクを減少させるこ



S-net (左図) 及び DONET (右図) の観測点 (黒三角) のうち、本稿における地震波形での検証に使用した観測点を赤三角で示す。

表 2 地震波形に対する検証結果

観測網	DONET	S-net
解析対象期間	2019/1/1~ 2020/9/30	2019/1/1~ 2020/9/30
対象トリガ数	209	1613
検知トリガ数	9	149
誤検知率	4.3%	9.2%

表 3 誤検知率のマグニチュード依存

	DONET	S-net
$5.5 \leq M$	0.0% (0/6)	2.2% (1/45)
$5.0 \leq M < 5.5$	0.0% (0/13)	1.6% (1/63)
$4.5 \leq M < 5.0$	0.0% (0/21)	3.0% (4/135)
$4.0 \leq M < 4.5$	0.0% (0/22)	4.6% (16/347)
$3.5 \leq M < 4.0$	6.2% (4/65)	8.2% (41/498)
$3.0 \leq M < 3.5$	6.1% (5/82)	16.4% (86/525)

とができる。

一方で、本手法を緊急地震速報の処理に適用した場合に懸念される影響として、本物の地震波形をエアガンシグナルと誤って認識し、緊急地震速報の発表が遅延することが考えられる。緊急地震速報(予報)の発表基準の1つであるマグニチュード3.5以上の地震波形データに対する誤検知率(表3)は、DONETで3.1%(4/127)、S-netで5.8%(63/1088)であり、単純計算で約20~30観測点に1観測点で誤検知が生じることになる。また、マグニチュード5以上の地震波形データに対する誤検知率(表3)は、DONETで0.0%(0/19)、

S-netで1.9%(2/108)であり、単純計算で約50観測点に1観測点で誤検知が生じることになる。誤検知率の低さに加え、緊急地震速報の発表遅延が発生し得るのは震源近傍の観測点において誤検知が生じた場合のみであること、緊急地震速報(警報)を発表するような規模の大きい地震ほど高周波成分が卓越しなくなるため誤検知率が低下することから、本手法を適用することに伴う、自然地震波形をエアガンシグナルと誤って認識することによる緊急地震速報の遅延の可能性は極めて低いと考えられる。

また、本手法は周波数の観点から地震波形とエアガ

ンシグナルを識別しているため、エアガンシグナル以外の高周波ノイズにも適用できる可能性が高い。緊急地震速報に活用している観測点のうち、島嶼部を中心としたノイズが多い観測点におけるノイズ対策に活用できる可能性を持つ。さらに、緊急地震速報に比べて規模の小さな地震まで対象としている気象庁一元化震源における自動震源決定処理へ適用した場合、エアガンシグナルによって自然地震ではないイベントが生成・登録されることが回避できると期待される。

4 まとめ

レベルクロス法を用いて閾値を設定し、併せて振幅比も考慮することにより、地震波形とエアガンシグナルを即時に識別できることが分かった。過去のエアガンによる構造探査事例に適用したところ、観測網や調査船の種類によらず、概ね95%のエアガンシグナルを識別することができた。計算負荷が小さな手法のため、緊急地震速報の処理への適用が可能であり、エアガンシグナルによる過大警報の可能性を低下させることができる考える。

謝辞

本検証では国立研究開発法人防災科学技術研究所にて運用管理されているDONET, S-netの波形データを使用しました。記して感謝いたします。

また、本稿作成にあたり多くの助言をいただきました気象研究所の鎌谷博士に深く感謝申し上げます。

文献

- 気象庁 (2020): 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料,
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eeew/data/nc/katsuyou/reference.pdf>, (参照 2020-10-01).
- Tamaribuchi, K., F. Hirose, A. Noda, Y. Iwasaki, K. Iwakiri and H. Ueno (2021): Noise classification for the unified earthquake catalog using ensemble learning: the enhanced image of seismic activity along the Japan Trench by the S-net seafloor network, *Earth, Planets and Space*, **73**:91, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01411-6>

(編集担当 重野 伸昭)