

インフラサウンド・アレイ観測による雪崩発生箇所の推定の試み

新井伸夫*1、今井俊昭*2、大槻政哉*2、齋藤佳彦*2、村山貴彦*3、岩國真紀子*3

1. はじめに

雪崩の発生箇所やその発生のタイミングに関する情報は、雪崩の発生を予測するモデルの構築やその予測精度向上を図るための重要な検証データとなる。そのため、雪崩の発生を監視しようとする取り組みが、各所で行われている。監視は、夜間を含む視界の悪い状況下でも雪崩の活動を把握しうるものであることが望ましい。また、複数の斜面を含む数 km 四方の地域を効率よくカバーすることも望まれる。そのような要求に応えるものとして、インフラサウンドの観測に基づく監視があり、近年、各所で実用化に向けた取り組みが実施されてきている^{例えば、[1], [2], [3], [4], [5]}。

インフラサウンド（超低周波音）とは、可聴域よりも低周波数側の音波であり、その波長の長さ故、伝搬による減衰は小さく、ほぼ幾何減衰のみで説明が可能である。よって、シグナルは遠方にまで届きやすく、その観測による発生監視は、数 km 四方の地域をカバーするのに適したものとなることが期待される。

筆者らは、インフラサウンドを用いた雪崩の発生監視システムを構築することを目的に、新潟県十日町市において、インフラサウンドの観測を実施してきた。まず、2013年1月から4月の期間、雪崩現象が励起するインフラサウンド・シグナルを確認するとともにその波形の特徴把握を目的として、1地点にて観測を実施した^[6]。次いで2014年1月から4月の冬季シーズンには、2地点にて観測を行い、主に距離減衰特性の把握を行った^[7]。なお、この2シーズンの観測は、いずれも監視対象斜面を定め、その映像をWeb Cameraにて1秒間隔で取得し、その映像にて雪崩の発生を確認した上で、そのイベントに対応するシグナルを探索するという手順でシグナルの抽出を行っている。

それら観測にて、雪崩が発するインフラサウンドの特徴を概ね把握し得たことから、2014年11月から2015年4月の期間、3点のアレイ観測を実施し、それら3地点のインフラサウンド・データのみを用い（映像をシグナル抽出のトリガーとはせずに）、シグナルの相互相関をもとに雪崩発生箇所の推定を試みた。本稿は、その観測および解析手法と結果について報告するものである。

2. 観測の概要

2014年11月下旬から2015年4月末までの期間、過去2冬季シーズンにわたり雪崩が励起するインフラサウンドの観測を実施した新潟県十日町市の山間部にて、3点のアレイ観

測を実施した。3つの観測点（以下、A点、B点、C点）のうち、A点は、過去2シーズンにおいても観測を行った地点であり、その点を頂点に内角が140度となる三角形の他の2つの頂点にB、C点を配置した（図1、表1を参照）。A点は、足場を組んで設置した鋼製物置内に、BおよびC地点は、木造2階建ての住宅の空き部屋に、それぞれセンサを設置した。

インフラサウンド・センサとしては水晶振動式絶対気圧計6000-16B（米国Paroscientific社製）を用い、100Hzサンプリング（22Hzのhigh-cut filterを適用）で専用ロガーNL-6000Cにデータを収録した^[8]。データの時刻は、各点にてGPSシグナルにより校正した。

3. シグナル解析と雪崩発生箇所の推定

3.1 雪崩が励起したインフラサウンド・シグナルの抽出

観測に用いたセンサが絶対気圧計であることから、得られたデータには気象現象に起因する気圧変動が含まれていると予想される。ただし、気象現象による気圧変動は、



図1 観測点（A点、B点、C点）の配置図

表1 観測点の設置状況

	A点	B点	C点
標高	525m	700m	485m
設置場所	物置	木造住宅	木造住宅
地形	山地斜面	尾根	沢
A地点からの距離		917m	981m

*1 名古屋大学、*2 雪研スノーイーターズ、*3 日本気象協会

時間軸上に局在する雪崩のシグナルに比して緩やかに変動すると考えられ、また、短時間で変化する風に起因する微小気圧変動ノイズは、気象現象による緩やかなトレンドを平均値としてその周辺に（圧力変動の観点からすれば、その平均値の上下に）正規分布していると仮定してもおかしくないであろう。そこで、雪崩に起因するインフラサウンド・シグナルを観測された絶対気圧データから抽出するため、次に示す処理を行った。

まず、任意の時刻 t について、直前の T 秒間のデータを1次回帰して次の s 秒間の中点（時刻 $t + s/2$ ）の予測値を作成し、時刻 t と $t + s$ の s 秒間の平均値との差を得て、それを時刻 $t + s/2$ におけるデータ（気象現象などの影響を除去したもの）とした（図2参照）。ここで、 $T > s$ としているが、任意時刻の直前 T 秒間のデータの回帰式を用いて次の区間データの予測を行うこととしたのは、気象現象のトレンドを除去するためであり、区間 s の平均を求めているのは、風によるノイズを相殺することで除去するためである。

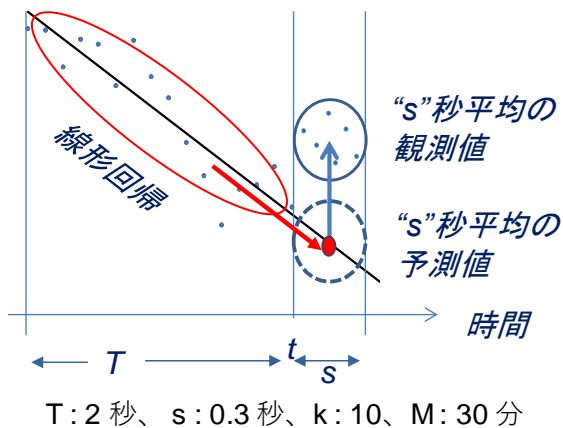


図2 気象現象に起因する気圧変動の除去方法

このような操作を繰り返し、アレイの各地点の時系列データ群を作成した。なお、シグナル抽出に周波数領域でバンドパスフィルターを適用する方法を用いなかったのは、リアルタイムでのシグナル抽出手法の構築を目指しているからである。

続いて、時刻 t の直前 M 分間の時系列データのRMSを求めて、それを $RMS(t)$ とし、時刻 $t + s/2$ のデータの絶対値との比を計算した。そして、その値が $RMS(t)$ の k 倍を上回った場合、有意なシグナルが到来したと判断した。

そのようにして抽出したシグナルを対象に3地点の相互相関を計算し（A-B、A-C、B-Cの3つの組み合わせそれぞれの相互相関を計算）相関係数が0.6を超えた場合、同一音源による顕著なシグナルが到来したと判断し、相関の最も高くなる時間差を、シグナルの到達時間差とした。

最後に、抽出したものが雪崩以外の事象によるシグナルである可能性を除外するため、波形を目視し、雪崩による

シグナルの特徴である紡錘形の包括線を有することを確認した。

なお、今回は、顕著な観測波形を抽出すること、抽出イベント数が大量にならないことを念頭に試行錯誤的にパラメータを変えて試算を行い、最終的には、 $T:2$ 秒、 $s:0.3$ 秒、 $k:10$ 、 $M:30$ 分を適用し、全期間の処理を行った。ここで、 M の値を30分と比較的長い時間に設定したのは、発達した積乱雲の通過や乱れを伴った強風の発生といった荒天が継続する時間スケールを考慮したためである。

上述の手順を経て抽出された雪崩の特徴を有するインフラサウンド・シグナルの例を図3に示す。また、図4に、抽出されたそのシグナルの振幅の大きい部分を拡大して示した。図からは、3地点相互にシグナルの形状がよく似ていることが見て取れる。このことから、今回採用した長周期トレンドや風のノイズの除去の方法が、適切であったことが推察される。

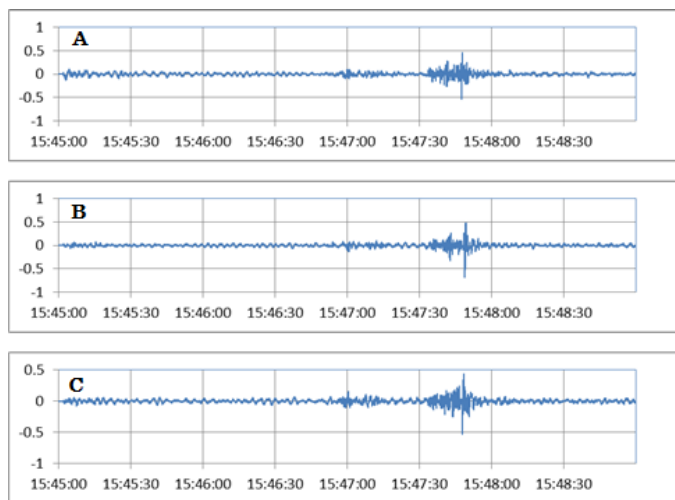


図3 抽出された波形（事例：2015年1月22日）
[$T=2$ 秒、 $s=0.3$ 秒、縦軸の単位：Pa]

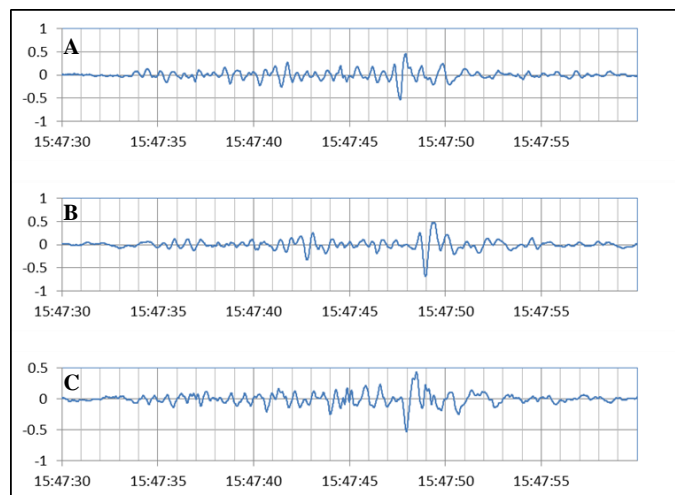


図4 抽出された波形の拡大図
（事例：2015年1月22日）

[$T=2$ 秒、 $s=0.3$ 秒、縦軸の単位：Pa]

3.2 雪崩発生箇所の推定

抽出したシグナルについて、アレイを構成する3地点相互の相関解析から求めた到達時間差をもとに、音源（雪崩発生箇所）を推定した。

2点の観測データの相互相関解析から得られた到達時間差が出現する音源候補地点は、その2つの観測点を焦点とする双曲線として表現される。そこで、得られた3組の到達時間差をもとに3本の双曲線を描き、その3本の曲線が1か所で交わった地点をシグナルの音源位置とした（図5を参照）。

なお、雪崩は数10mの空間スケールを持った雪塊の崩落現象であることを考慮し、ここでは、50mメッシュ単位で位置推定を行った。なお、推定にあたっては、地形は

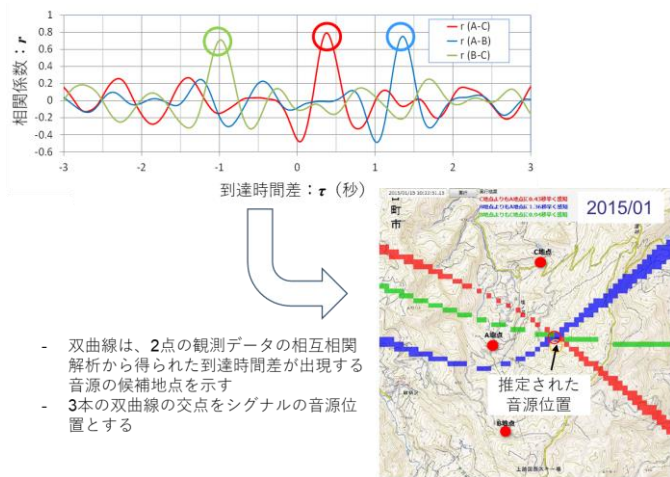


図 5 抽出された波形の時間差を用いた音源位置の算定方法

考慮しておらず、候補地点メッシュは平面上に分布していると仮定した。

また、到達時間差 τ にも ± 0.1 秒の幅をもたせて候補地点の推定を行った。到達時間差に誤差幅として ± 0.1 秒を付加したのは、シグナル抽出の手法が不十分である可能性やGPSによる時刻同期が行えなかった場合の時刻誤差の可能性を考慮したためである。ただし、ここで与えた ± 0.1 秒が妥当な値かどうかの吟味は、ここではしていない。

以上の手順で観測データから抽出されたシグナルについて解析を行ったところ、13事例について収束した解を得た。その結果を図6に示す。推定された雪崩の発生箇所はアレイの東側に集中して分布しており、そのエリアには急峻な沢地形が複数存在することから、雪崩が発生していてもおかしくはないと考えられる。推定位置にはその事象が発生した日時を付している。その発生日と、アレイに最も近い気象庁アメダス観測点の津南における日別積雪深との関係を図7に示した。この図からは、積雪深が減少傾向にあるときに雪崩が発生していることが見て取れる。この関係は、気温が上昇して融雪水により積雪底面に弱層が形成されたときに全層雪崩が起きやすいという一般的傾向と整合しているようにも思われる。ただし、推定箇所で真に雪崩が発生したのかについては、さらに詳しい検証が必要である。

なお、アレイが扁平な三角形であったこともあり、抽出されたすべてのシグナルが1か所に収れんしたわけではない。遠方で生じた雪崩によるシグナルを観測した可能性もあり、雪崩発生位置の推定方法には、検証データ

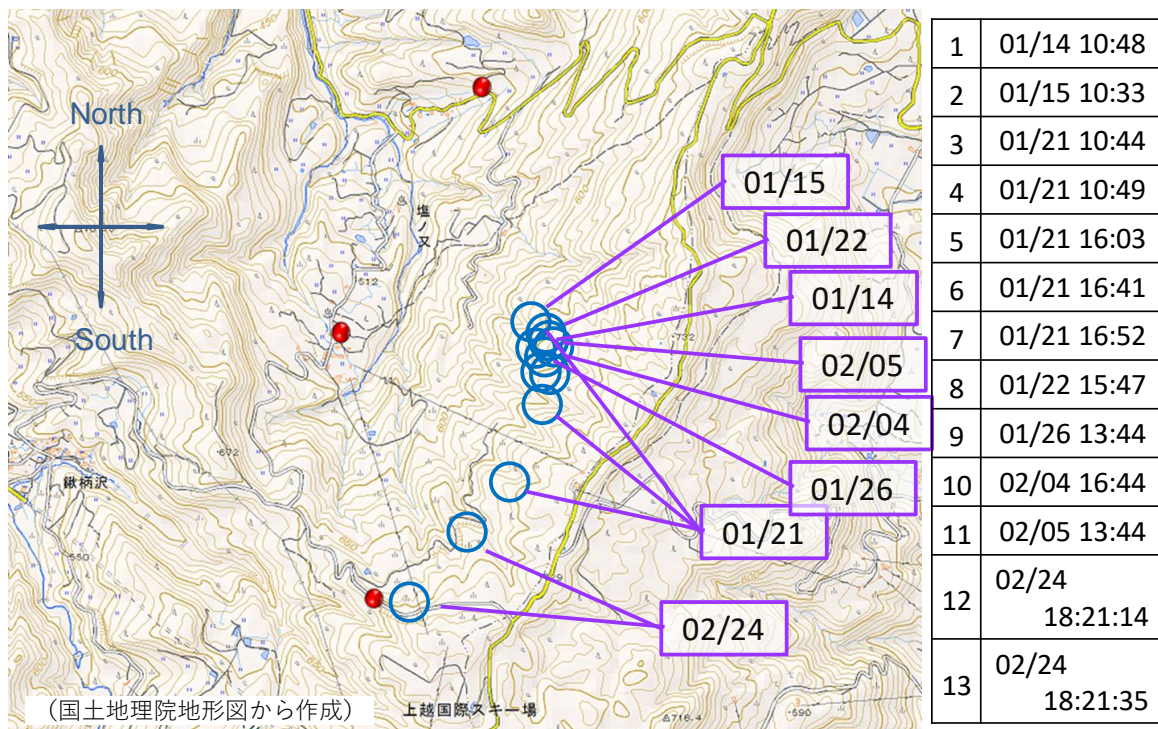


図 6 推定された雪崩の発生箇所

に基づくさらなる改良が必要とも考えている。しかしながら、今回の観測とその結果の解析からは、1 km程度の観測点間隔を有するアレイ観測を行うことで、周辺数km四方の斜面における雪崩の発生をモニタリングし得る可能性を示すことはできたと考えている。

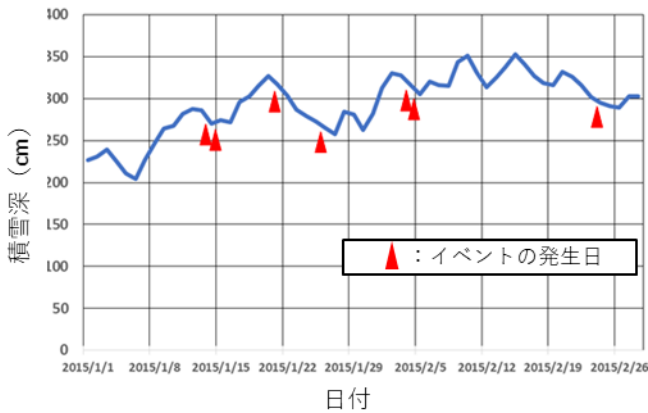


図 7 イベント発生日と気象庁アメダス（津南）日別積雪深の比較

4. まとめ

過去2冬季シーズンにわたり雪崩が励起するインフラサウンドの観測を行ってきた新潟県十日町市の山間部において、2014年の11月末から2015年4月にかけて径間1 km強のサイズを有する3点アレイ観測を実施し、雪崩に起因するシグナルの検知と発生箇所の推定を試みた。

発生箇所を推定し得たと判断できる事例を13事例得たが、アレイを構成する3点が扁平な三角形形状となってしまったという配置上の問題もあり、検知されたすべての雪崩由来のシグナルについて、その発生箇所を明確にできたわけではない。

しかしながら、アレイ観測を実施することで周辺地域の雪崩の発生箇所や発生頻度をモニタリングする可能性を示すことができたと考えている。

あるエリアにおける雪崩の発生状況を把握できるようになれば、その結果と気象条件や地形などをあわせ検討することで、どのような条件のときにどのような場所で雪崩が起こりやすいのかといった考察が可能になると期待される。

今後も雪崩をモニタリングする手法の開発・高度化を目指し、観測を継続して知見を蓄積するとともに、考察を深めていきたいと考えている。UAVを用いた対象地域の空撮画像の取得などにより検証データを得ることも検討しており、雪崩発生に関する他の情報をあわせ検討することで精度の向上を図っていきたい。

参考文献

- [1] Marchetti E., M. Ripepe, G. Ulivieri, and A. Kogelnig, Infrasound array criteria for automatic detection and front velocity estimation of snow avalanches: towards a real-time early-warning system, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 3, pp.2709-2737, 2015.
- [2] Thuring T., M. Schoch, A. van Herwijnen, and J. Schweizer, Robust snow avalanche detection using supervised machine learning with infrasonic sensor arrays, Cold Regions Science and Technology, 111, pp.60-66, 2015.
- [3] Ulivieri G., E. Marchetti, M. Ripepe, I. Chiambretti, and V. Segor, Infrasonic monitoring of snow avalanches in the Alps, Proceedings 2012 International Snow Science Workshop, pp.723-728, 2012.
- [4] Kogelnig A., E. Surinach, I. Vilajosana, J. Hubl, B. Sovilla, M. Hiller, and F. Dufour, On the complementarity of infrasound and seismic sensors for monitoring snow avalanches, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, pp.2355-2370, 2011.
- [5] Scott E. D., C. T. Hayward, R. F. Kubichek, J. C. Hamann, J. W. Pierre, B. Comey, and T. Mendenhall, Single and multiple sensor identification of avalanche-generated infrasound, Cold Region Science and Technology, 47, pp.159-170, 2007.
- [6] 新井伸夫・岩國真紀子・谷本早紀・栗原靖・高橋大介・荒木啓司・村山貴彦、雪崩現象が励起した低周波音、騒音・振動研究会資料、N-2013-51、2013.
- [7] 新井伸夫・岩國真紀子・村山貴彦、インフラサウンド観測による雪崩遠隔監視の試み、第30回寒地技術シンポジウム、pp.194-199、2014.
- [8] 村山貴彦・今西祐一・綿田辰吾・大井拓磨・新井伸夫・岩國真紀子・野上麻美、ナノ分解能気圧センサを用いた可搬型インフラサウンド観測システムの開発、東京大学地震研究所技術研究報告、No.17、pp.63-76、2011.