九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

中竜鉱山における３成分地震計アレイ観測

松本，聡
九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

松島，健
九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

平野，憲雄
京都大学防災研究所

池端，慶
九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

他

https://doi.org/10.15017/19177

出版情報：九州大学大学院理学研究院研究報告．地球惑星科学．22（4），pp.1-8，2011-03．九州大学大学院理学研究院
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

九大理研報（地球惑星），22 巻 4 号，1 － 8 頁，2011 年 3 月

中竜鉱山における３成分地震計アレイ観測

松本　聡*・松島　健*・平野憲雄**・池端　慶*・中元真美*・山下裕亮*・糸谷夏実*・栢橋志郎*
佐々木裕樹**・千葉慶太**・千藏ひろみ*・宮崎真大*・野村和正***・李 哲 俊***・武田哲也****
浅野陽一****・小原一成*****・飯尾能久**

Three component seismic array observation at galleries in Nakatatsu mine, Fukui, Japan

Satoshi Matumoto*, Takeshi Matsushima*, Norio Hirano**, Kei Ikehata*, Manami Nakamoto*,
Yusuke Yamashita*, Natsumi Itoya*, Shiro Kayahashi*, Yuuki Sasaki**, Keita Chiba**, Hiromi Chikura*,
Masahiro Miyazaki*, Kazumasa Nomura***, Tesshun Li***, Tetsuya Takeda****, Youichi Asano****,
Kazushige Obara***** and Yoshihisa Iio**

Abstract

We carried out seismic array observation in mining tunnels of Nakatatsu mine, Fukui, Japan. This observation site is located at about 20 kilometers away from the earthquake fault of Nobi earthquake (1891, M8.0). The major purposes in this observation are: 1) detection of small-scale heterogeneity around the fault; and 2) development of technique to explore structure by using seismic array data. Eighty seismometers which have three components with natural frequency of two hertz were deployed. The observation continued from September 2009 until the middle of February 2010. The sensors were connected to the recording system by cables. The data were converted to digital data by 24bit delta-sigma converter with maximum sampling interval of 1 ms and extracted from memory to storage by self-triggering algorithm in the system. The recording time is 16 – 64 sec. More than 100 earthquakes were recorded in the observation. We were able to obtain seismograms of not only local earthquakes but also distant earthquakes. The good environment for observation with hard rock site and low artificial noise allowed us to obtain high quality data. Some records of the earthquakes have adequate S/N ratios up to hertz. In addition, many scattered phases which could be generated by small-scale heterogeneity in the mid- to lower crust in this area were observed with sufficiently large amplitude.

Key words: seismic array, high frequency, heterogeneity, Nakatatsu Mine

要　旨

濃尾地震断層から約20km離れた，福井県大野市，中竜鉱業所有の中竜鉱山において，地震計アレイ観測を行った．観測の目的はこの断層周辺の不均質構造検出と，アレイ観測に基づく高精度の構造推定

平成22年11月30日受付，平成23年1月14日受理
*　九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター
〒855-0843 長崎県島原市新山2丁目5643-29; matumoto@sevo.kyushu-u.ac.jp
**　京都大学防災研究所
〒611-0011 宇治市五ヶ庄
***　京都大学理学部
〒606-8502 京都市左京区北白川追分町
****　防災科学技術研究所
〒305-0006 つくば市天王台3-1
*****　東京大学地震研究所
〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1
*　Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University
Shinyama 2-5643-29, Shimabara City, Nagasaki 855-0843, Japan
**　Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
Goka-sho, Uji City, Kyoto 611-0011, Japan
***　Faculty of Science, Kyoto University
Kitashirakawa-Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan
****　National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention
3-1, Tennodai, Tsukuba City, Ibaraki 305-0006, Japan
*****　Earthquake Research Institute, University of Tokyo
1-1-1, Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

法の開発である．濃尾地震は複数の断層セグメントをまたいで発生しているが，これらのセグメント間の不均質構造を理解することは極めて重要である．

地震計アレイ観測は坑口から約120m下の坑道内で行った．センサーは2Hz3成分地震計を用い，10-40 m間隔で80点設置した．これらを物理探査用CDPケーブルで接続し，データ収録装置にトリガー収録した．AD変換は24bit, サンプリングは最大1kHzで行った．観測期間は2009年9月から2010年2月中旬のほぼ4カ月にわたって行った．収録された地震は近地だけでなく遠地地震もあり，100イベント以上が収録された．収録された地震のうち，S/Nのよいものは100 Hz以上まで解析に耐えうる，極めて良好な記録である．坑道内は一定温度で，すべてが岩盤で，人工ノイズもほとんどないことからこのような高周波数帯まで記録が可能であった．得られた記録を重合することで，下部地殻やモホ面からの散乱波が検出された．これらと濃尾地震断層との関係を調べることで地震発生過程への理解に寄与できると期待される．

1．はじめに

地震計アレイ観測は，解析する地震波の1/2波長より短い間隔で多数の地震計を展開して行う稠密観測であり，得られたデータをbeam formingする処理によって波の到来方向を特定することができる．自然地震や人工地震の後続波（コーダ波）は地球内部の不均質構造による反射・散乱波で生成されると考えられており，地震計アレイ観測による後続波の到来方向から地球内部の散乱体分布を調べる研究が進められてきた（松本，2008: Nishigami and Matsumoto, 2009によるレビュー参照）．地震発生メカニズムを知る上で，短波長不均質構造は重要な役割をもつことが知られているが，地震計アレイ観測は人工的なノイズの混入によって数十ヘルツ（Hz）よりも高周波数の信号を得ることが困難なことが多い．しかし，人工ノイズが小さいと考えられる鉱山の坑道内はこのような観測に適していると考えられる．そこで，本研究では中部地方に位置し，1891年濃尾地震断層にも近い中竜鉱山で地震計アレイ観測を行い，自然地震を収録して，その特性を調べることにする．

2. 中竜鉱山における地震計アレイ観測

2.1. 中竜鉱山の概要

中竜鉱山は日本最大級の内陸地震である1891年濃尾地震の地震断層から約20km離れた，福井県大野市和泉地区に位置する鉛・亜鉛鉱山である．鉱床は飛騨外縁帯の古生代（約4億年）石灰岩類が白亜紀最末期～古第三紀初期（6100万年）に貫入した珪長質マグマ（石英斑岩）に伴って生じた熱水による交代作用を受けて形成されたスカルン鉱床で，東から西へ中山・人形・仙翁・黒当戸などの鉱床群が東西6 km，南北1.5 kmの範囲に分布している．鉱床を構成している岩石の密度は3.2～3.6 g cm^{-3}と極めて緻密堅固であり，岩石強度試験結果により圧縮強度，引張強度ともコンクリートの10倍程度の強度をもつことが判明している．鉱床の発見は古く1250年頃と言われ，本格的に開発を行いはじめた1934年から1987年の休山まで粗鉱約1200万t採掘，産出金属量は鉛5.6万t，亜鉛55万t，銀330 tであり，釜石鉱山，神岡鉱山とともに日本を代表するスカルン鉱床であった．（中竜鉱業，私信）

2.2. 地震計アレイ設置及び観測システム

観測は2009年9月10日より2010年2月24日まで行った．これに先立ち約1週間の設置作業を行った．設置はのべ約100人日の作業工程が必要であった．地震計アレイは中竜鉱山坑口から120m下の坑道内に展開した．鉱山における測線の位置, 形状を図1に示す．アレイの口径は約0.8－1.6kmである．測線の大半の部分は乾燥状態にあり，中竜鉱業（株）によってよく管理されていることから，観測にとって良好な条件である．坑道内は気温約14℃，湿度90％で一定状態であり，観測システムに影響を及ぼす大きな温度変化はない．

本研究で用いる観測システムは防災科学技術研究所所有のシステムであり，地震計，ケーブル，データ収録装置の3つに分けられる部分から成り立っている．図2にブロックダイアグラムを示す．地震計は米国Mark Products社（現Sercel 社）製，L22-3D型地震計を用いた．これは, 固有周期2Hz,3成分一体型, 動コイル型地震計である．これを測線上に10－40 m間隔で80台設置した．アレイ観測ではターゲットとする波動の波長，伝播速度に対して，アレイの分解能や検出波長帯域を最適化するには，限られた地震計数や口径（測線長）の中で最適な空間配置を考えなければならない．地震計アレイに入射する波動場を離散的に展開された地震計によって検出する場合，地震計間隔は検出できる波長の下限を規定する．一方ではアレイの口径はこの波長の上限および分解能に影響する．また，地震計の数は，その数だけ得られた信号を重合することが出来るためにS/N比改善に重要な役割を演じる．この重合処理に際しては，地震計間の波形相関が高いことが必要であるが，一般に地震計間の距離が大きくなると波形相関は低くなる．これはアレイ測線近傍の局所的な構造不均質によるもので，波形相関が崩れる距離が実質的なアレイ口径の最大値を支配することになる．地震計間の波形相似性がアレイ設置以前には未知であるために，大きすぎる地震計間隔は検出可能波長の下限を高くするだけではなく，重合可能な信号数を減らすおそれがある．アレイ分解能はアレイ口径によって

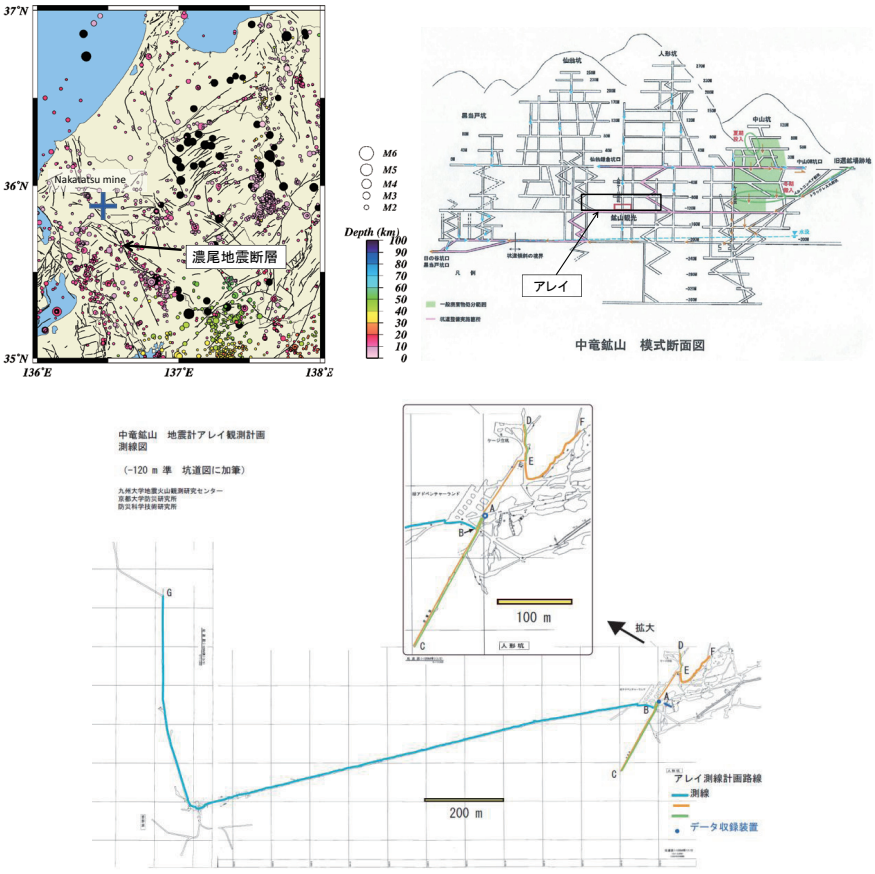

図1．上左図）地震計アレイ位置図．図中の○は防災科学技術研究所によって決定された，観測期間中に発生した自然地震の震央を示す（●は深さが100 kmより深い地震の震央）．黒丸は何を示すのか？上右図）中竜鉱山の坑道模式図とアレイ位置

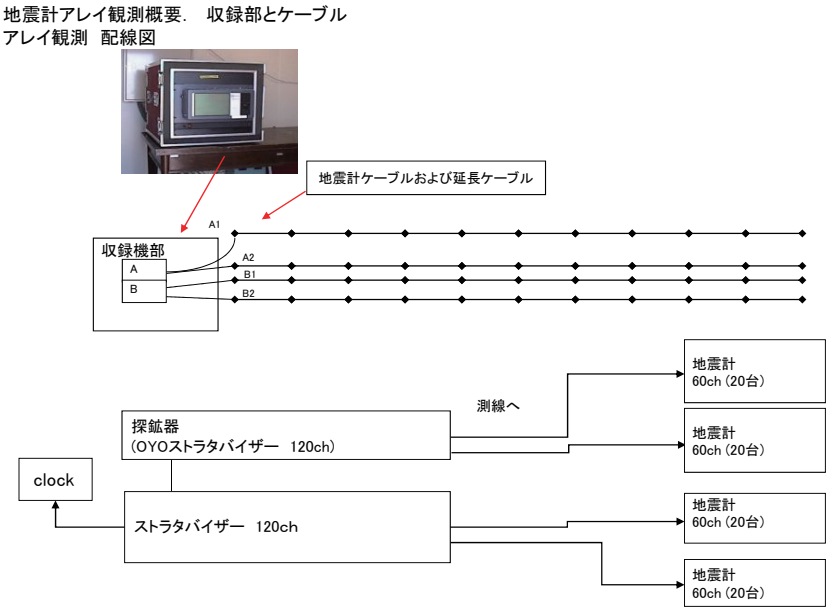

図2．観測システムのダイアグラム．測線は60 ch CDPケーブル4本で構成され，240 ch（80点3成分）を探鉱器で収録した．イベント収録はトリガー信号を同期することで同時トリガを行った．トリガは測線上の6点におけるSTA/LTAのANDによって判定した．サンプリング間隔は時期により1,2,4 msecと変えて収録した．データ長はこれらのサンプリング間隔によって変わり，16，32，64秒である．

きまることは述べたが，この口径は波長によって規格化された大きさを意味する．すなわち，アレイでとらえられる波数が重要である．さらに，入射波動場を2次元的にとらえるにはアレイ形状も2次元である必要がある．広い波長帯域で分解能を上げるには，どの波長に対してもアレイでとらえられる波数が2次元的に大きいことが望ましい．前に述べた議論を加えて言い換えると，どの波長帯域で見てもアレイの形状が“波形相関のある範囲で”2次元的にみえる必要がある．これらの様々な条件を考えたうえで，本観測では地震計間隔は測線の角部分で短く，直線部分では長くとった．

図3．地震計設置状況．3成分地震計は10 mm厚のアルミプレート状に設置された．黒いケーブルがCDPケーブル．

図4．ケーブル設置･撤収状況．車の後部にリールを乗せ，ケーブルを展開，回収した．

図5．データ収録装置．収録装置はビニールで囲った空間を作り，そこへ設置した．中には除湿機を置き，湿度を落とすことで安定して運転できるようになった．

地震計を展開する坑道はすべて岩盤に囲まれており，坑道部分は掘削した際の岩砕石によって作られているために，地震計の水平をとることが困難であった．このため，厚さ10 mmのアルミプレートを長さ100－300mmの鉄製ボルトで坑道脇に固定し，地震計はその上に設置した（図3）．一部の地震計は坑道脇にセメントによって台を作り，地震計を固定した．設置した地震計は地震探査用CDPケーブル（120芯ケーブル）によってデータ収録装置に接続される．このケーブルは1本60チャンネル（20地震計）接続可能であるため，80台の地震計は4本の経路を通して接続した．各CDPケーブルには6chの信号が入力可能であるためにこれらを10本つないで一つの経路を構成する．ケーブルの展開はディーゼルトラックを用いて行った（図4）

データ収録装置は120 chの収録装置2台を基本に行った．収録装置はGeometrix (OYO) Strataviser NX120で，AD変換はデルタシグマ型24bit AD変換器120個によってチャンネルごとに行われる．サンプリング間隔は初めの3カ月は4 msec，その後 1 msec, 8 msecと1カ月ごとに変更した．装置のメモリ上の制限から，収録時間は1,2,4 msecのサンプリング間隔に対してそれぞれ 32, 64, 128秒間である．AD変換自体は連続的に行い，その振幅情報を監視するイベントトリガー方式によって収録した．イベント判定は収録可能時間での平均二乗振幅値の平方根(R.M.S振幅値)(LTA)に対する1秒間のR.M.S振幅値（STA）の比が測線上の6点において同時に4倍以上となった場合にイベントと判定した．2台の収録装置はLANを通じてトリガー情報を交換するため，トリガー時刻を同期することが出来る．時刻は1台のGPS自動校正時計を2台の収録装置で用い，時刻情報を共通にした．ただし，坑道内は当然，GPS衛星電波は受信できないため，時刻校正が出来ない．したがって，絶対時刻の議論は本観測ではできない．観測期間中はデータ収録装置，時計などをビニールで囲み，その中に除湿機を設置した（図5）．これは高い湿度によって収録装置内に結露したり，その他動作不安定を起こしたりするトラブルを避けるためである．とくに，高速サンプリングの際は途中で収録装置のハングアップやADボードの動作不良を起こした．このため，収録装置の交換等をメンテナンス時に何度か行った．

観測期間中，500回以上のイベントと判定されたデータが記録された．このうち100個程度が自然地震の記録であった．この中にはS-P時間1秒以内のアレイ近傍で発生した地震や遠地地震が含まれている．残りの400個以上はいわゆるノイズによってトリガー判定されたイベントである．得られた波形記録をみると，これらのノイズは鉱山内の急激な電圧

変動，電気的なパルスノイズによるものなどが主な原因であると考えられる．

3. 観測波形の特徴

3.1. 周波数特性

本節では，得られた自然地震のデータより，波形の特徴などについて述べる．図6に得られた自然地震の波形例を示す．これはアレイから約20km離れた位置で発生したM1.6の浅発地震である．震源は防災科学技術研究所によって決定されたものを用いている．図にはアレイのうち上下動成分の記録を示している．図中で，ノイズの大きな地震計がいくつか見られるが，これは主として近傍に走る電源線による60 Hzのノイズによるものである．このうち1観測点におけるノイズ部分とP波初動部分の約2秒間の速度振幅スペクトルを図7に示す．この観測期間はAD変換のサンプリング間隔が2msであるので，250Hzまでのスペクトルを示している．これからわかるように，

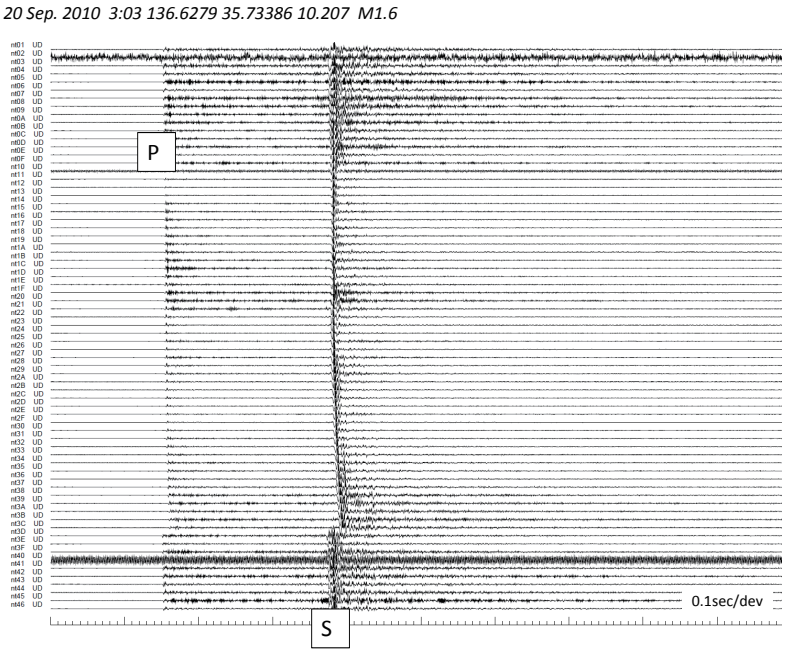

図6. 観測波形例．上下動地震計の波形を示す．図中のP, Sは直達P波，S波の部分を示す．

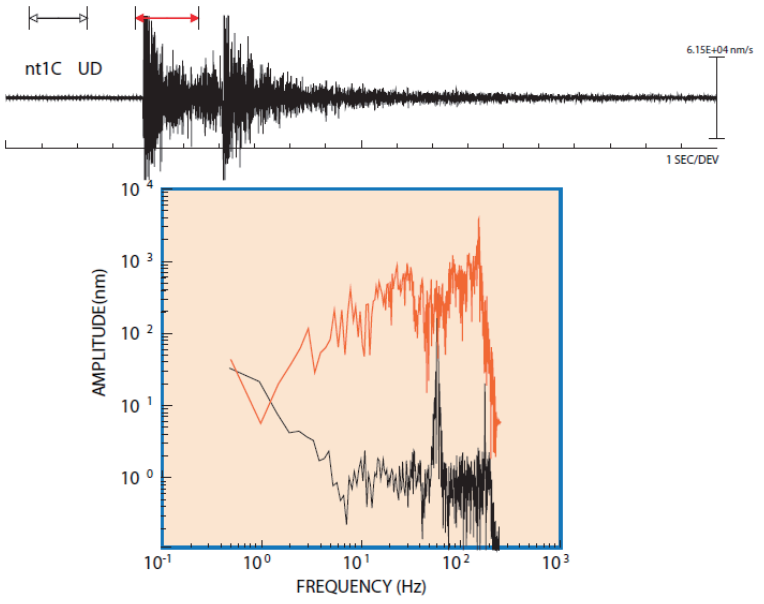

図7. アレイの1点における上下動地震計記録（上図）とノイズ部分（黒線）と直達P波部分（赤線）の振幅スペクトル（下図）．上図中での矢印はスペクトルウィンドウを示す．

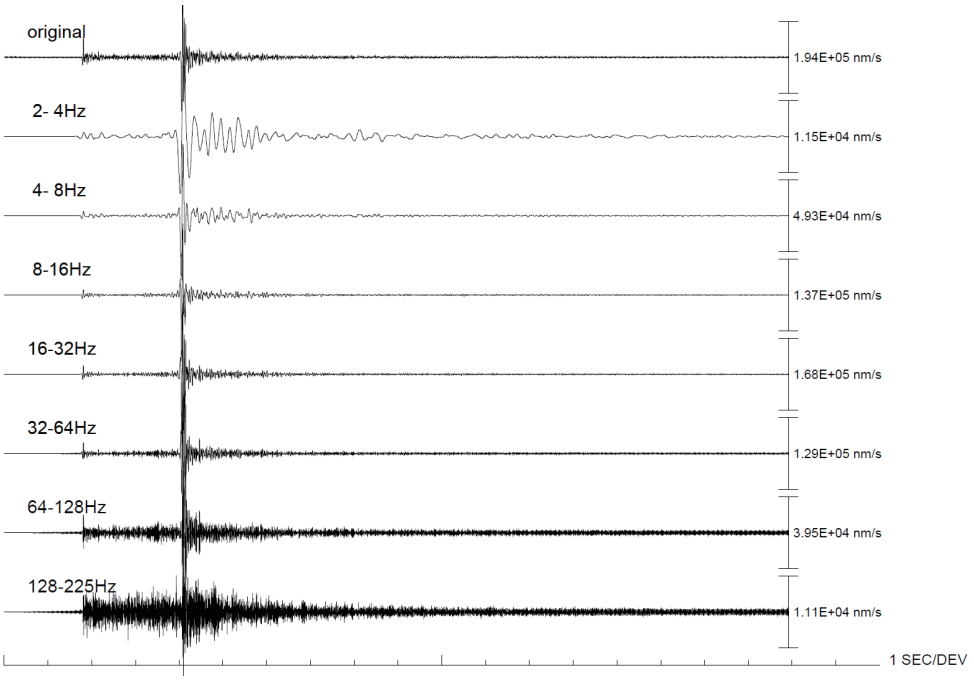

図8. 図7で示した波形のバンドパスフィルター処理波形.

振幅スペクトルは200 Hzを超えてもなお，十分なS/N比を持っていることが分かる．ノイズ部分はP波到達直前の波形部分を取っているので，地震計および記録計の応答は変化していないと考えることができる．したがって，この高周波の信号は地動を表していると考えられる．自然地震の震源から放射される地震波の速度スペクトルは，コーナー周波数の低周波側および高周波側でそれぞれ周波数の－1，＋1乗に比例している（Aki and Richards, 1980）と考えられている．図7に示された波形はこのモデルよりもスペクトル全体が時計回りに回転した形になっている．これは震源から観測点への伝播途中で減衰を受けた影響と解釈できる．特に高周波数帯では強い減衰を受けている．一方，地震のソースパラメータにScaling Lawが成り立つとすると，M1.6の地震の断層半径は30m程度であり，破壊速度を3 km s^{-1}（S波速度3.4 km s^{-1}の0.9倍）とするとコーナー周波数は100 Hz程度になる．これは，図7から読み取れるコーナー周波数約150 Hzと矛盾しない．この地震計アレイが，震源から放射された高周波を十分なS/N比で捉えている可能性が高い．ノイズ部分にみられる60 Hzの鋭いピークは電源の影響である．地表で行われる通常の地震観測で得られる近地地震の波形で，十分なS/N比が得られるのはせいぜい20－30 Hzまでである．このことから考えると中竜鉱山では極めてバックグラウンドのノイズが小さく，良好な観測環境であることを示している．図8にはこの地震のバンドパスフィルター波形記録を示す．バンドパスフィルターは7つのバンド（2-4, 4-8, 8-16, 16-32, 32-64, 64-128, 128-225 Hz）の2次バターワース特性を持つフィルターを用いた．この図から初動到達時から10秒後でもすべての周波数帯で十分なS/N比をもった記録であることが見て取れる．

3.2. 波形相関

先にも述べたように，アレイ信号処理においてはセンサー間の波形相関が微弱信号検出にとって大変重要である．ここでは本観測における地震計間の波形相関について調べる．図7で用いた波形と同じイベントについて，直達P波部分の波形の相関についてみることにする．地震計アレイの上下動地震記録を図8と同じ7つのバンドのフィルターを通し，直達P波0.25秒間の波形（2-4 Hz帯は0.5秒）を直達波方向について重合し，その相関係数を調べる．ここでは相関係数としてセンブランス係数（Niedell and Tanner, 1971）を用いることにする．まず，直達波方向はいろいろなスローネスについて，すべての地震計の波形を重合することでセンブランス係数を計算し，最大値を示す方向を直達波到来方向とした．ここでは4-8 Hz帯の推定結果を直達波方向として用いた．次に，アレイ間の任意の2点の直達波部分の波形を重合し，そのセンブランス係数を計算する．すべての地震計の組み合わせを，地震計間の距離の関数として並べ，0.025kmごとに平均をとり，相関の地震計間距離依存性を調べた．図9に各周波数帯における，距離に対する相関プロットを示す．2-4, 4-8 Hz帯においては1km以上離れても0.7以上の値を示す．8-16，16-32Hz帯においても0.7km程度まで0.6以上の値を示している．32Hz以上の帯域においては相関係数が距離とともに急激に減少している．32-64 Hz帯では1/eになるまでの地震計間距離が約0.15 km,

それ以上の高周波数では0.05 km以下となっている．ここで見られるように，30 Hz程度の周波数帯において十分な相関がみられることは多くない．地震計アレイを用いて地殻内部において散乱された波動を検出する解析においてはせいぜい10 Hz程度の周波数帯が用いられるのが通常である（たとえば，Matsumoto et al., 2001）．これは地震計アレイ間の波形相関が20 Hz程度以上の高周波数帯では崩れるために，微弱な散乱波を効率よく検出できないことが主たる理由である．その意味では，10 Hz以下では波形は極めて相関がよい，本研究のアレイは設置環境が均一で，微弱な散乱波を検出することに適しているといえる．

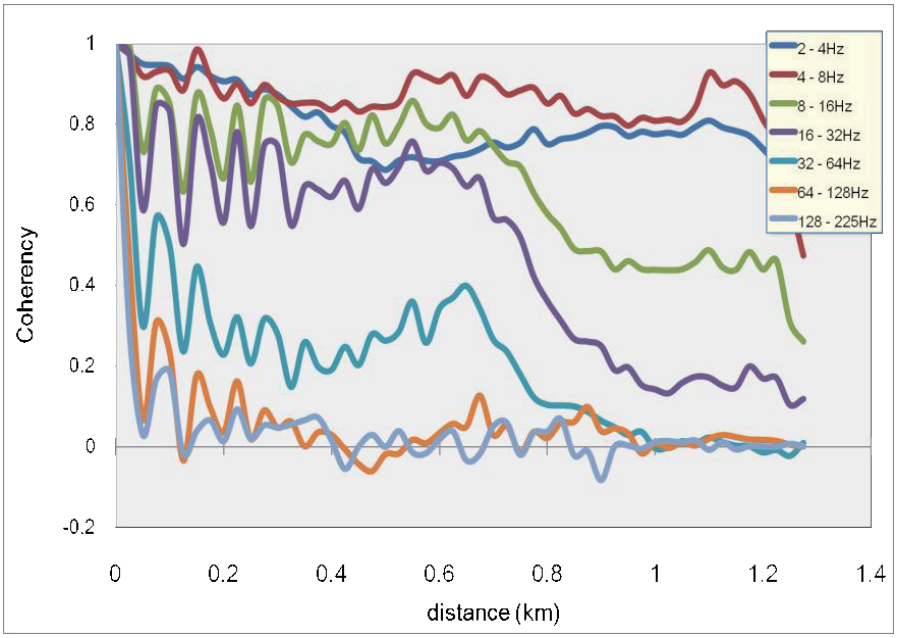

図9．周波数ごとの直達P波の観測点波形相関（上下動成分）．横軸は観測点間距離．すべての組み合わせを取り，距離ごとに平均して求めた．

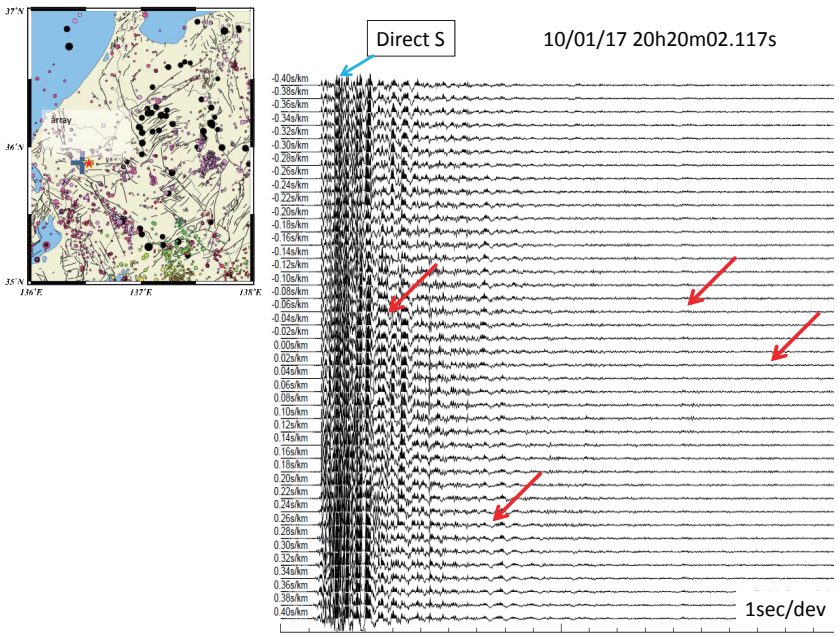

図10．地図中に★で示された地震のアレイ記録を直達波方位についてslant stack した波形． stack 波形は南北動成分を用いた．重合slownessは±0.4 sec km^{-1}の範囲，バンドパスフィルターは2-20 Hz．青矢印は直達S波，赤矢印は散乱波を示す．

3.3. 重合波形例

微弱な散乱波を波形重合によって強調し，検出することが出来るのが地震計アレイの最大の特徴である．重合は通常，波の到来方向をさまざまに仮定し，そのスローネスと地震計位置によって決まる地震計間の時間遅れを補正した後，すべての地震計記録を足し合わす（slant stack）．これによって，特定の方向から到来する波群を強調して検出することが出来る．ここで，収録された波形を重合したものを示す．図10にはアレイ近傍で発生した地震の南北動地震計記録をいろいろなスローネスで重合した（slant stack）記録例を示す．ここで2-20 Hzのバンドパスフィルターを通した波形記録を用いている．図から見てわかるように，直達S波より後に続いていくつか目立つ振幅の波群が到達している．中でも直達S波の後，2，6，12，17秒後あたりの波群は明瞭である．自然地震のS波は，P波に比べてエネルギーが大きいことから，後続波は震源からS波として放射され，散乱された波であると仮定すると，およその位置を推定することができる．この地震の場合，震央距離3 km，深さ4.6 kmである．震源決定に用いたS波速度構造はほぼ均質の3.4 km s^{-1}である．したがって，この場合の散乱波が水平の反射面によるものであると仮定すると，たとえば，17秒後に見られる波群に対応する反射面深度は,約30 kmとなり，モホ面で散乱された波である可能性が高い．そのほかのものも，地震発生域の下部で散乱されていると考えられる．

4. まとめ

人工ノイズの極めて小さい，中竜鉱山の坑道内で地震計アレイ観測を行った．得られた自然地震の記録の特徴は以下のとおりである．

- 100Hzを超える周波数帯においても，十分なS/N比を持つ記録が得られる．
- 地震計間の波形相関は高く，30 Hz帯まで波形相関は1 km近くでも0.6を超える．これは地震計アレイ観測サイトとして極めて良好である．
- 得られた自然地震の記録から，地震発生域の下部からモホ面の間に存在する不均質構造からの散乱波と考えられる波群が明瞭に見出された．

今後，得られた記録を詳細に解析することによって，広い周波数帯域での地殻内不均質構造がイメージされると期待できる．

5. 謝　辞

中竜鉱業（株）の皆さまには，本観測についてご理解を賜り，設置・保守・撤収において多大なお力添えをいただいた．清水　洋教授には注意深く論文を査読いただき，有益なコメントをいただきました．記して感謝の意を表します．

本研究は文部科学省による「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の支援を受けました．

6. 参考文献

Aki, K., and Richards, P. (1980) *Quantitative Seismology - Theory and Methods*, Vols. 1 and 2, W. H. Freeman, San Francisco. pp. 1-913.

松本　聡（2009）地震波散乱構造, 地震, 2, 61, S209-216.

Matsumoto, S., Obara, K., Yoshimoto, K., Saito, T., Ito, A., and Hasegawa, A. (2001) Temporal change in P-wave scatterer distribution associated with the M6.1 earthquake near Iwate volcano, northeastern Japan. *Geophys. J. Int.,* **145**, 48-58.

Neidell, N.S., and Tanner, M.T. (1971) Semblance and other coherency measures for multi-channel data, *Geophysics,* **36**, 482-497.

Nishigami, K., and S. Matsumoto.(2008) Imaging inhomogeneous structures in the Earth by coda envelope inversion and seismic array observation. In: Dmowska, R., Sato, H., and Fehler, M., (Eds.), Advances in geophysics: *Earth heterogeneity and scattering effects on seismic waves,* Academic Press, Elsevier Ltd., St. Louis, 50, 11, pp. 301-318,