HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	十勝岳の火口近傍における力学観測 : 序報
Author(s)	青山, 裕; 田中, 良; 橋本, 武志; 村上, 亮; 成田, 翔平
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 83, 25-48
Issue Date	2020-03-19
DOI	10.14943/gbhu.83.25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/77090
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	bulletin (article)
File Information	GBHU_83_p25-48.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 83, March 2020, pp. 25 － 48
doi : 10. 14943 / gbhu. 83. 25

論説

十勝岳の火口近傍における力学観測：序報

青山　裕・田中　良・橋本　武志・村上　亮
北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター
成田　翔平
北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

（2020 年 2 月 24 日受理）

Seismic and geodetic monitoring near the active crater at Tokachidake volcano (preliminary report)

Hiroshi AOYAMA, Ryo TANAKA, Takeshi HASHIMOTO, Makoto MURAKAMI
Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University
Shohei NARITA
Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

（Received February 24, 2020）

Broadband seismometer and tiltmeter newly installed near the crater of Tokachidake volcano made it possible to observe interesting tilt change events that had not been recognized at Tokachidake before. These events are mainly observed at the Maetokachi West station（MTKW）built in October 2016. The tilt events are roughly classified into the following three types: 1. Oscillating micro tilt fluctuation with a period of about several hundred seconds that is remarkable in the horizontal component of the broadband seismometer, 2. Small tilt change that can be recognized as an event by both the broadband seismometer and the tiltmeter, 3. Tilt change that can be remarkably recognized even in the long-term tilt record. Micro tilt fluctuation in type 1 has an amplitude of about several nanoradian at MTKW and it seems that it appears and disappears in response to the atmospheric pressure change. The oscillation direction of the tilt fluctuation at MTKW is between N35°W and N45°W. Small tilt change in type 2 has an amplitude of several tens to several hundreds of nanoradian at MTKW. Many events show step-like subsidence in the crater direction, but some events with slightly large amplitude show complex time functions. Tilt change in type 3 has an amplitude of several microradian at MTKW that can be recognized even in long-term tilt records. Type 3 events were clearly confirmed from November 1 to November 5, 2019 and on January 20, 2020. Tilt changes that seem to be a series of type 3 events were also observed from around November 25, 2019 to December 7, 2019. These phenomena are thought to reflect some pressure fluctuations in the shallow part near the crater. Similar tilt change events have also been reported in Azumayama volcano. These tilt events may be a universal phenomenon in volcanoes with active fumaroles and hydrothermal activities.

BY-NC
この論文はクリエイティブ・コモンズ 表示－非営利 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています（http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/）.

Ⅰ．は　じ　め　に

道内有数の活動的火山である十勝岳は，1926 年噴火による大規模泥流が山麓に甚大な災害をもたらしたことで広く知られる．1962 年には高度 12000m まで噴煙をあげる VEI3 の噴火を起こして千島列島まで降灰をもたらし，1988 年末から 1989 年 3 月にかけても小規模な火砕流を伴うブルカノ式噴火やストロンボリ式噴火を繰り返す顕著な噴火活動を行ってきた（気象庁，2013）．1989 年以降は，現在に至るまでおよそ 30 年にわたりマグマの噴出を伴う噴火活動はない．2004 年 2 月にごく小規模な水蒸気噴火の報告があるものの，最近 30 年はいわゆる「噴火休止期」と呼ばれる状況にある．しかしながら，噴火休止期に極端に活動度が低下する有珠山や北海道駒ヶ岳などとは異なり，十勝岳では噴火活動が見られない時期にも定常的に活発な噴気活動や火山ガス放出が認められる（Mori et al., 2006）．この特徴は，十勝岳が地下深部から熱や火山性流体が継続的に供給される環境にあることを示唆している（Tanaka et al., 2017）．しばしば発生する群発地震活動や火山性微動なども，熱や流体の輸送を反映しているのであろう．

十勝岳では 1989 年 3 月のマグマ噴火活動終息以降も，特記すべき火山現象がいくつか報告されている（気象庁，2013）．1995 年には山体周辺で規模の小さな A 型地震の活動が活発化した．1998 年には，地震活動の増大と 62 火口群での噴気孔形成や温度上昇などが認められたあと，9 月に火山ガス放出の影響と考えられる樹木の葉枯れが山麓で確認された．62-Ⅱ火口内では熱泥水の噴泉が確認され，噴気活動も活発化したほか，山麓の高感度カメラによって 62-Ⅱ火口周辺が夜間に明るく見える現象も観測された．2000 年にも 62-Ⅱ火口内で熱泥水噴出が確認され，2004 年 2 月にはごく小規模な水蒸気噴火があった．

2006 年頃から 62-Ⅱ火口の噴気高度が低下し始めたのと呼応するように，道立地質研究所と北

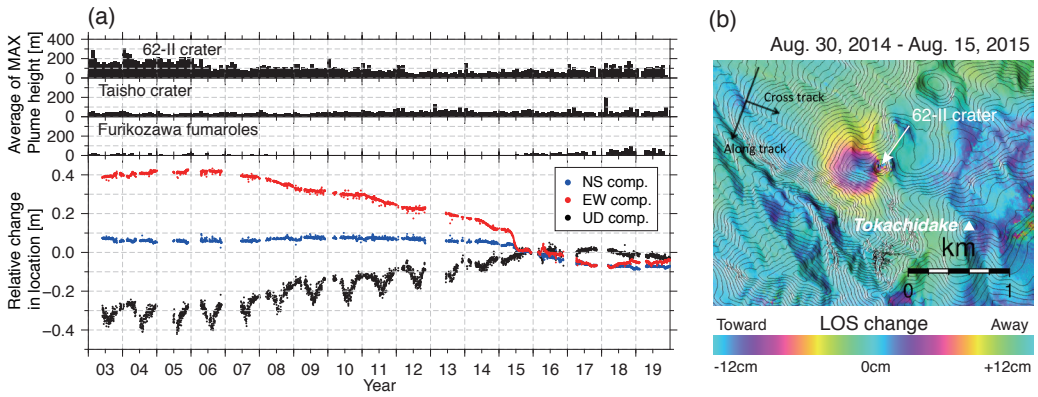

Fig. 1. （a）Temporal change of fumarolic plume heights and relative position of Maetokachi GNSS station to Bogakudai GNSS station since 2003. The plume heights are given by the average of the daily maximum height in one month. The plume height data are provided from JMA Sapporo. The GNSS data are provided from Geological Survey of Hokkaido.（b）LOS change around the summit area observed by ALOS-2/PALSAR-2 in the period from August 30, 2014 to August 15, 2015.

大理学部が前十勝ピークに設置していたGNSSで，顕著な西方への変位や隆起が観測されるようになった（Fig. 1a）．この地盤変動は加速や停滞を繰り返しながら2017年秋頃まで継続し，累積の水平変位量はおよそ50cm，隆起変位量はおよそ30cmに及んだ．特に2015年の夏には変動が一時的に加速し，3ヶ月で10cm近い変位が観測されたほか，InSAR解析によっても前十勝に局所的な膨張性変動が生じていることが明らかになった（Fig. 1b）．火口周辺で繰り返し実施されてきた磁気測量からは，62火口直下での消磁が地盤変動と呼応するように進行していることが確認された（橋本・他，2010）．この2006年から続いた長期の変動については，すでに多くの報告や発表がなされているので，本論では割愛する．

1989年以降マグマ噴火が発生していない十勝岳において，長期にわたり顕著な地殻変動や消磁傾向が進行していること，口永良部島でも極めて類似した長期的地盤変動や磁場変化が2014年噴火の前に観測されていたことなどを踏まえ，北大大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター（以降，北大地震火山センターと記す）では2014年から十勝岳の常時観測施設の整備を進めてきた．その結果，以前には認識できていなかったようなイベントや信号の存在が確認されるようになり，火山噴火予知連絡会などを通じて報告してきた．本論では2014年以降に新設した観測点で得られた観測記録を中心に，特徴的なイベントや信号の事例を紹介する．個々のイベントや信号の発生過程について定量的に解析することは現象を理解する上でもちろん必要であるが，まずはそれらの発生パターンや活動の特徴を把握することが重要であろう．

Ⅱ．2014年からの観測施設整備

北大地震火山センターでは，2014年度より始まった「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）」において，「熱水系が卓越する火山」の比較研究を全国共同研究課題として推進してきた．この課題では当初，十勝岳，吾妻山，草津白根山，阿蘇山，口永良部島の5火山を主な研究対象に設定し，それぞれの火山で火口近傍における多項目観測を強化・推進することとしていた．実際には5年の研究期間中に，研究対象火山のうち3つの火山が噴火した（口永良部島2014年〜，阿蘇山2015年〜，草津白根山2018年）ほか，2014年9月には御嶽山でVEI2相当とされる水蒸気噴火が発生して多くの死傷者を出し，水蒸気噴火に対する社会的関心が大きく高まった．

十勝岳は道内の活火山の中でも特に冬期の気象条件が厳しいことに加え，腐食性の火山ガスを常時放出しているため，火口近傍で高精度の観測施設を連続運用することが極めて難しい．2014年以前の火口に最も近い広帯域地震計や傾斜計を備えた観測施設は，火口から北西に約2.2km離れた北大の十勝岳坑道観測点（TKC）であった（Fig. 2）．気象庁ではより火口に近い高標高の地点にも地震観測点を設けていたが（摺鉢火口：V.SBKK，グラウンド火口西：V.TKGN），いずれも1成分ないしは2成分の短周期地震計しかなく，短周期地震の活動しかモニタリングできないという状況であった．

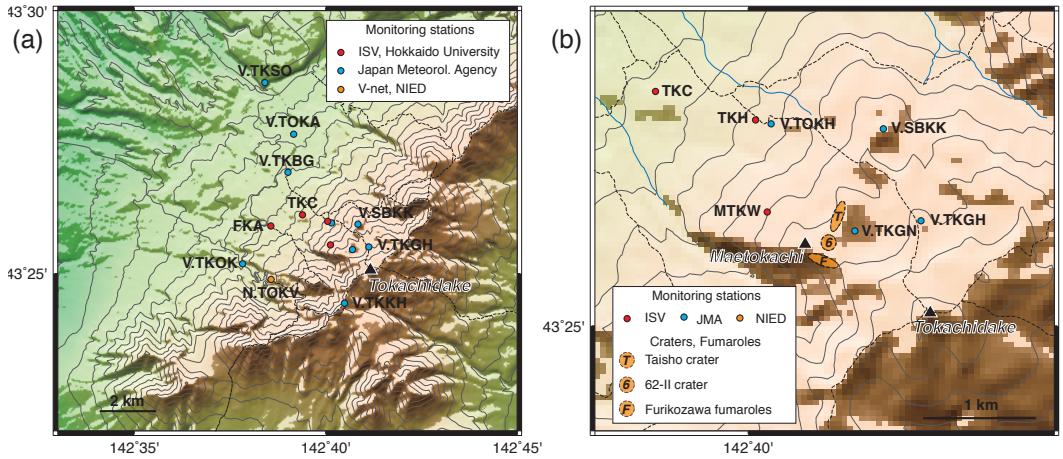

Fig. 2. (a) Location map of permanent volcano monitoring stations around Tokachidake volcano. (b) Close up around the summit area. Three different organizations contribute to the real-time monitoring of Tokachidake volcano. Bogakudai and Maetokachi GNSS stations referred to in Fig. 1a are located near V.TKBG in (a) and near the Maetokachi summit in (b), respectively.

火口近傍での長周期の振動現象や微小地盤変動を観測する目的で，北大地震火山センターでは2014 年からの研究課題をはじめるにあたり，坑道観測点よりも火口に近い十勝岳避難小屋の近傍に広帯域地震計とボアホール型傾斜計からなる施設（避難小屋観測点：TKH）の新設を計画した．避難小屋に隣接した北海道開発局の観測局舎まで山麓から交流電源と光通信ケーブルが埋設整備されており，観測機器の動作とデータの連続送信にこれらの電源と通信設備を借用することで，通年の連続観測に目処が立ったためである．2014 年の夏期に避難小屋観測点を整備したのとほぼ同時期に，62 火口の近傍にも 2 箇所の全磁力観測点を設置して連続観測を開始した．その後，2014 年 9 月の御嶽山噴火災害をうけて文部科学省から火山観測施設整備のための予算措置がなされ，2016 年秋に前十勝の西側斜面の標高 1590m 付近にボアホール型の地震計と傾斜計および空振計を備えた火口近傍観測点（前十勝西観測点：MTKW）を追加整備することができた．ここでは，新設した 2 つの力学観測点の概要を簡単に紹介する．

・避難小屋観測点

避難小屋観測点（TKH）は，62-Ⅱ火口の北西約 1.3km に位置する十勝岳避難小屋に隣接している（Fig. 2）．観測点の設置工事は 2014 年 7 月から 8 月にかけて行い，避難小屋の山側 20m 付近に深さ約 3m の地震計ピットと深さ約 12m の傾斜計設置孔を設け，それぞれ Metrozet 製 PBB-200S 広帯域地震計と Pinnacle 製 Denali 傾斜計を設置した（Table 1）．両センサーからの電圧出力は，開発局観測局舎内に設置したテレメータ装置（白山工業製 LS7000XT）に入力して win 形式（卜部，1994）のデジタルデータに変換したあと，開発局の光通信ケーブルを通じて山麓の白金温泉にある十勝岳砂防情報センターへ送り，そこから NTT 通信線を経由して札幌キャンパスまで伝

Table 1. Specification and settings of monitoring devices at TKH and MTKW

Station TKH	Seismometer:	Metrozet PBB-200	
		Band width	120 s - 50 Hz
		Sensitivity	1500 V/m/s
	Tiltmeter:	Pinnacle Denali	
		Cutoff frequency	30 s
		Analog sensitivity	0.011 V/μrad (Gain setting 2)
	Telemeter:	Hakusan LS7000XT	
		A/D resolution	24 bit (+/-10V)
		Sampling rate	100 Hz
Station MTKW	Seismometer:	Nanometrics Trillium Posthole T120-PH2	
		Band width	114.8 s - 146 Hz (-3dB corner)
		Sensitivity	1200 V/m/s
	Tiltmeter:	Pinnacle Denali	
		Cutoff frequency	30 s
		Analog sensitivity	0.011 V/μrad (Gain setting 2)
	Microphone:	Hakusan SI-104	
		Cutoff period	20 s
		Sensitivity	0.001 V/Pa
	Telemeter:	Scimolex SC-ADS213-HV	
		A/D resolution	22 bit (+/-10V)
		Sampling rate	100 Hz

送している．

観測点の周辺一帯は 1926 年噴火による極めて新しい岩屑なだれ堆積物に覆われており（石塚・他，2010），1m 程度の岩塊の隙間を土砂が埋めるような不安定な地盤である．傾斜観測孔の設営工事では，掘削用泥水やケーシング固定用セメントの逸水にたびたび見舞われた．このような状況も，避難小屋一帯の地表付近には空隙が多く，高精度の地盤変動観測にはあまり適さない不安定な地盤であることを示している．そのため，地震計ピットには栗石を敷き詰めて転圧した上に L100cm × W40cm × D80cm のコンクリート製地震計台を作成して 55cm 埋め戻し，地盤とのカップリング向上を図った．

・前十勝西観測点

前十勝西観測点（MTKW）は，前十勝ピーク西側斜面上の標高約 1590m の地点にある（Fig. 2）．2020 年 2 月時点では，上下動短周期地震計が設置されている気象庁のグラウンド火口西観測点（V.TKGN）に次いで活動火口に近い．62-Ⅱ火口からは西北西へ約 0.6km の位置にあたる．設置工事は 2016 年 8 月から 10 月にかけて行い，施工に必要な資材はほぼ全てヘリコプターで白金温泉から輸送した．現地には太陽光発電装置，ステンレス製観測局舎，深度約 4m の地震観測孔，深度約 12m の傾斜観測孔を設け，それぞれの観測孔に Nanometrics 製の Trillium Posthole T120-

PH2 広帯域地震計および Pinnacle 製の Denali 傾斜計を設置したほか，太陽光発電装置の支柱に白山工業製の SI-104 空振計を取り付けた（Table 1）．これらのセンサーからの電圧出力は，観測局舎内のテレメータ装置（シモレックス製 SC-ADS213-HV）で win 形式（卜部，1994）のデジタルデータに変換したあと，白山工業製 RM320 無線装置を通じて山麓の上富良野町役場まで無線伝送し，そこから NTT 通信線を経由して札幌キャンパスまで伝送している．観測点現地は商用電源がなく冬期の気象条件が極めて厳しいことから，120W のソーラパネルを 18 枚用意し，正 3 角形に配置した金属製支柱の 3 面全てに 6 枚ずつ取り付けて発電能力の確保と耐風性向上を図った．また無線伝送装置のアンテナについても着氷と強風による破損を防ぐため，FRP 製のアンテナカバーを作成して八木アンテナ全体を覆う工夫を施した．しかしながら，2016 ～ 2017 年の冬期には強風でアンテナ仰角が変わってしまいデータ欠落が増える，2018 年 9 月には台風の強風でアンテナ支持金具が破断しアンテナが脱落するなど，2 年ほどはアンテナトラブルに繰り返し見舞われた．

観測点周辺の地表付近は 1962 年噴火などで噴出した噴石や火砕物で覆われているが，そのすぐ下には中期更新世の形成とされる平ヶ岳溶岩が広く分布している（石塚・他，2010）．平ヶ岳溶岩は非常に緻密で硬く，ヘリコプターで空輸できる規模の小型掘削装置を用いた削孔作業には予想外の時間を要した．地震観測孔と傾斜観測孔はともにこの平ヶ岳溶岩の中に定置されているため，地盤とのカップリングは極めて良い．

上に述べたような北大の観測点整備と前後して，気象庁でも火山観測点の整備・強化が行われてきた．2014 年 9 月に十勝岳避難小屋の近傍と摺鉢火口観測点の近傍に GNSS の臨時連続観測点が設けられ，2018 年 10 月には道立地質研究所と北大理学部が運用してきた前十勝の GNSS 観測点を引き継ぎ，気象庁の GNSS 臨時観測点として運用が始まった．2016 年 12 月には火口域の東側に広帯域地震計を備えたグラウンド火口東観測点（V.TKGH）が，既存の摺鉢火口観測点の近傍に孔井型傾斜計の摺鉢火口 3 観測点（V.SBK3，Fig. 2 中では V.SBKK でまとめて表示）が新設された．同時に，避難小屋近傍には可視および熱映像の遠望観測施設も設けられた．

Ⅲ．2014 年以降の火山活動の概要

避難小屋観測点を新設した 2014 年夏期は，2006 年頃から始まった前十勝の膨張性の地盤変動が継続する中にあった（Fig. 1a）．望岳台を固定した相対変位でみると，2006 年夏期から 2014 年夏期までの累積変位量は，西方へ 25cm 程度であることがわかる．上下変位については設置直後から凍上等によると思われる大きな年周変化が重畳するものの，水平変位とほぼ同じ 25cm 程度の隆起が認められる．2014 年末から 2015 年 3 月にかけて一時的な変動率の低下が認められた後の 5 月頃から，それまでの約 10 年では見られなかった急速な地盤変動が始まった．7 月末頃ま

でのおよそ 3 ヶ月程度で，前十勝ピークの周辺は 10cm 近く西方へせり出した．この期間の変動は InSAR 解析によっても明瞭に認められ，変動の中心は前十勝ピークの近傍に現れている（Fig. 1b）．筆者らが 8 月に現地作業を行った際には，前十勝と 62-Ⅱ火口を結ぶ稜線の周辺に，弱い噴気を伴う地表亀裂の発達が確認できた．この地盤変動の加速期には，火口直下の浅い部分を中心とした地震活動にも活発化が認められている（Fig. 3）．避難小屋東観測点（V.TOKH）における気象庁での計数では，2003 年以降で最高となる月間回数（2015 年 5 月：392 回）を記録した．

その後も 2017 年末頃まで前十勝ピークの西進運動は継続し，2006 年からの累積変位量は西方へ約 50cm となった．一方，南北成分には 2015 年頃まではほとんど変化が見られなかったが，2015 年の変動加速期頃から 2017 年末にかけて 10cm 以上の南進運動が認められた（Fig. 1a）．上下方向成分は冬期に隆起を示す年周変化の影響が大きいものの，2006 年からの累積隆起量は約 40cm に達している．前十勝の稜線周辺で見られた小さな亀裂は間もなく視認できなくなったものの，62-Ⅱ火口の南側に位置する振子沢噴気孔群では 2015 年 7 月頃から徐々に地熱活動域の拡大が進行した．2013 年頃まで 10cm 程度の振幅で見えていた上下変動成分の年周変化は 2014 年頃から小さくなり，2016 年にはほぼ認識できない程度まで減少した（Fig. 1a）．これは地熱域の拡大に伴って前十勝ピーク一帯でも地温が上がり，冬期の凍上が生じにくくなったためかもしれない．

2017 年末を過ぎると，それまでの変動傾向が大きく変化した．東西変位や上下変位は緩やかながらも逆方向への変動を示すようになり，南北成分に見られた南方向への運動も 2 年ほど停滞している．Fig. 1a に示した噴気高度からは，2017 年頃から僅かではあるが 62-Ⅱ火口や振子沢噴気孔群で高まってきているようにも見え，火口域からの火山性流体の放出量が増加しつつあることをうかがわせる．

2015 年の変動加速期に一時的に高まった B 型地震の活動は，変動速度の低下に呼応して元のレベルへ戻ったが，その後は 2017 年末にかけて緩やかに増大している（Fig. 3）．しかし，地盤

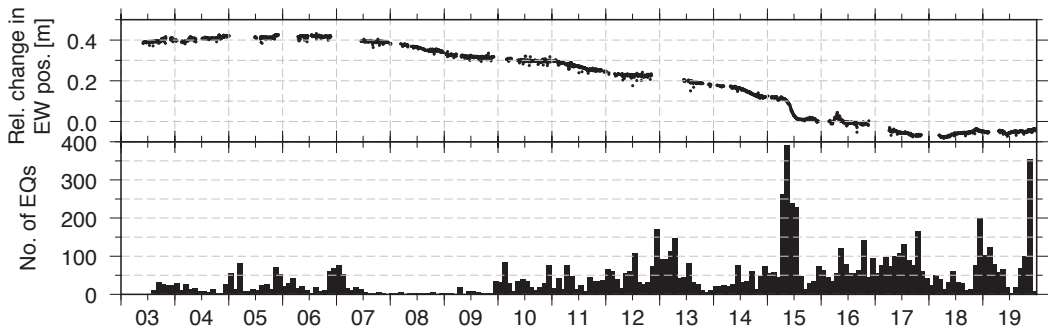

Fig. 3. Temporal change of EW component of Maetokachi GNSS station in Fig. 1a and the monthly number of B type earthquakes counted by JMA Sapporo since 2003.

変動の反転とほぼ時期を同じくして，計数基準に達する規模の地震活動は低下した．その後は2018年末から2019年初め，および2019年11月に地震活動の活発化が認められている．これら一連のB型地震活動の中で，2019年10月20日に極めて特徴的な波形を示すイベントが観測されたので簡単に紹介する．発生時刻は08:51:26頃で，北大地震火山センターでの検測では62火口近傍の海抜0.1kmに震源が求められた．マグニチュードは1.2と推定され，B型地震の中では規模が大きいが，スペクトルは一般的なB型地震の範囲内である．特徴的なのは地震の初動極性で，全ての観測点で「引き」を示す．気象庁ではより遠方の山麓観測点（防災科研Hi-netなどを含む）まで調査し，地震が記録された全ての観測点でP波初動が「引き」であることを確認している（気象庁，2019b）．初動極性が全て同一となるようなB型地震はマグマ噴火が盛んな桜島などで報告されているほか（例えば，井口，1989），海外ではアイスランドのKlafraカルデラで初動が全て引きとなる地震が報告されており（Mildon et al., 2016），いずれもマグマやマグマだまりの運動に直接関係したイベントと解釈されている．十勝岳ではこのようなイベントの認識は過去に例がなく，マグマ活動との関連は分からない．S相が視認できる観測点が比較的多いことも検測作業で確認しているが，初動極性が全て同一という特徴は体積変化成分が卓越する発震機構を想起させる．この地震の6時間後から火山体の浅い部分での地震活動がやや高まったが，それ以外には特段の変化は観測されていない．

Ⅳ．火口近傍の観測点でとらえられた特徴的なイベントや信号

北大地震火山センターや気象庁による火山観測施設整備により，2014年以前に比べて特徴的なイベントの検出率が格段に向上した．特に長周期の振動現象や微小な傾斜変動については初めて目にするようなイベントも多く，今後他火山との比較研究を進めていく上では，検出された信号についてまとめておくことは意義深い．信号を検出できる観測点が限られていることもあり，現状では定量的な解析に基づいて発生機構を論ずるところまで到達していないことを予め断っておく．

1．短時間の微小傾斜変動

2014年に避難小屋観測点（TKH）の傾斜計や広帯域地震計を設置して間もなく，ごく一部の火山性地震に同期して，傾斜計の信号に10～20 nrad程度の北東方向上がりを示すごく小さなステップ的な変動が認められる場合があることに気づいた．既設の十勝岳坑道観測点に設置されている2軸の気泡式傾斜計と1軸の水管傾斜計ではいずれも対応するような傾斜変動は見いだせないが，1軸の伸縮計だけには数nstrainのごく小さな伸張変化がステップ的に現れていた．このような信号の存在に気づいてから目視で類似イベントの発見に努めたところ，2014年10月からの9ヶ月間に少なくとも9回（2014年11月1日，12月22日，2015年2月23日，3月28日，4月1日，4月25日，5月15日，6月22日，6月23日）確認できた．

2016 年 10 月に前十勝西観測点（MTKW）が稼働しはじめると，火山性地震や微動に同期したステップ的な傾斜変化が明瞭に認識できるようになった．規模の小さなイベントは前十勝西観測点でしか認識できず，避難小屋と前十勝西の両方で信号が認められる場合には避難小屋に比べ前十勝西の傾斜変化量が大きいことから，火口周辺域を変動源とする現象であると推測される．以下に主要な微小傾斜変化イベントの例を示す．ここでは，イベントタイプの表現を簡単にするために，前十勝西観測点で北西方向隆起となる変化を「(62-Ⅱ火口方向の）沈降」と称す．イベントの選択は筆者の目視作業によるため，量的な検知基準は定めていない．

・ステップ的な沈降変動が顕著に認められるタイプ

このタイプのイベントでは，火山性地震に同期したステップ的な傾斜変化が特に顕著である．Fig. 4 には 2017 年 2 月 1 日 07:59 頃に発生したイベントの波形例を示す．Fig. 4a は前十勝西観測点（MTKW)，Fig. 4b は避難小屋観測点（TKH）における，広帯域地震計による地動速度 3 成分，地動変位 3 成分，傾斜計による傾斜変化 2 成分である．

前十勝西観測点における地動速度の水平成分には，火山性地震の波群に続いて 2 分ほどの小さな片揺れが認められる．この記録を積分して得られるのが Fig. 4a 中段の変位波形で，水平成分の大きなステップ的な変位が顕著である．ここに見られるような地震計固有周期の 120 秒よりも長い時定数の北向き，西向きの信号は見かけの変位であり，北方向，西方向が隆起するような回転運動が地震計に加えられたことを反映する（青山，2008）．Fig. 4a 最下段の傾斜計記録には地震計の変位波形とよく似たステップ的な傾斜変動が現れており，北方向が 0.26μrad，西方向が 0.1μrad 程度隆起したことが分かる．地震計の変位波形から換算される傾斜変動量も 10% 程度の違いで傾斜計の変動量と一致する．前十勝西観測点と 62-Ⅱ火口の位置関係を考えれば，この傾斜変動は火口方向の沈降に対応する．

避難小屋観測点における傾斜計記録も，同時刻に前十勝西より 1 桁ほど小さなステップ的変化

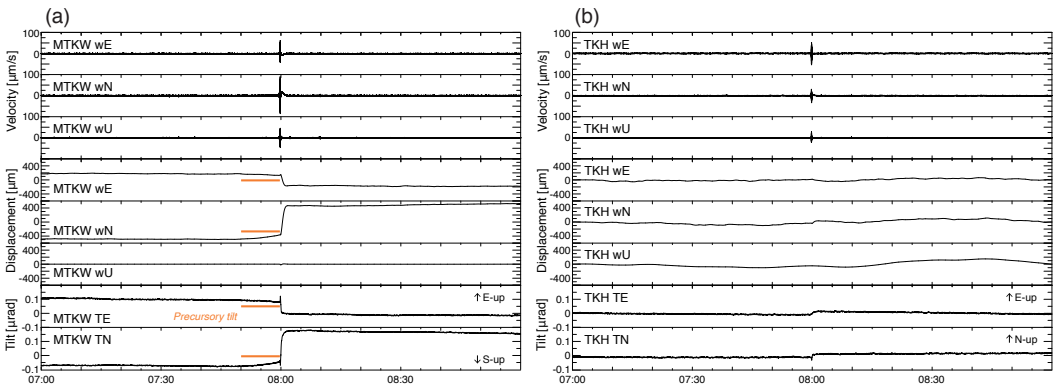

Fig. 4. Velocity and displacement seismograms and tilt change of the step-like tilt event observed at (a) MTKW and at (b) TKH on February 1, 2017. The event occurred at around 08:00 JST. Precursory phase can be seen both in horizontal displacement traces and tilt traces of MTKW.

を示している（Fig. 4b）．前に述べたように，避難小屋観測点では北東上がりの変動として見えている．一方で，広帯域地震計の変位波形では明瞭ではないものの，ごく僅かな北方および西方への見かけ変位が認められ，こちらは北西方向が隆起する（火口方向が沈降する）ような回転運動を示唆する．変位波形のふらつきが前十勝西観測点と大きく異なるのは，地盤条件や地震計性能の違いによるものと考えられる．

Fig. 4a の前十勝西観測点における波形記録を見ると，広帯域地震計変位波形より傾斜計出力の変動の方が変動の時定数が短いことがわかる．これは，両センサーの傾斜応答特性の違いが反映されているためである．階段関数的な傾斜変動が与えられた場合でも，地震計は地震計の固有周期（ここでは 120 秒）のローパスフィルターが施されたような見かけ変位（傾斜出力に相当）を与えるのに対し，傾斜計は設定した応答特性（ここでは 30 秒）のローパスフィルターがかかったような傾斜出力を与えることによる（青山，2008）．すなわち，このイベントによる火口方向沈降時のステップの時間関数は，傾斜計の応答時定数と同等もしくはそれより短い時間で進行したことをうかがわせる．

ここに示したイベントは，単純なステップ的変動に同極性の先行相を含んでいる．継続時間は 10 分ほどで，前十勝西観測点の傾斜計記録や地震計変位記録に認められる．緩やかに火口方向が沈降したあと，火山性地震の発生と同時に沈降がステップ的に進行したことを示す．同様のステップ的な火口方向の沈降ステップを示すイベントの中には，このような先行相が認められないものも多数存在する．

・緩やかな隆起変動に続き短時間の沈降変動を示すタイプ

このタイプのイベントでは，数分から 10 分程度の急速な火口方向下がりのステップ的変動と，それに先行した緩やかな傾斜変動が明瞭に認められる．先行相とステップ的変動は逆極性となっているところが，前のタイプと異なっている．Fig. 5 には 2018 年 5 月 14 日 04:59 頃に発生したイベントの波形例を示す．図内の各波形の成分は Fig. 4 と同じである．

Fig. 5a の前十勝西観測点における地動速度の水平成分には，04:59 頃の火山性地震の波群に続いて 2 段階に見える小さな片揺れが認められる．この記録を積分して得られる変位波形には，水平成分の大きなステップ的な変位が現れるとともに，地震の約 70 分前から東方向，南方向への緩やかな見かけ変位も確認できる．最下段の傾斜計記録でも同様の変動が見られる．火口と観測点との位置関係を考えると，70 分程度の火口方向隆起が見られた後，ごく小さな地震の発生と同時に火口方向の沈降が急速に進行したと解釈できよう．04:59 頃のステップ的な傾斜変動によって，変動開始前の傾斜レベルへほぼ戻っていることは興味深い．火口方向の沈降変動の時定数が前のタイプより数倍長いことに注意したい．

Fig. 5b の避難小屋観測点での観測データでは，04:59 頃のステップ的な変動は認識できるものの，およそ 70 分におよぶ先行変動を見いだすことは難しい．傾斜記録に現れるステップ的な変動は北東方向隆起を示す極性である一方，地震計の変位波形では火口方向の沈降をうかがわせる

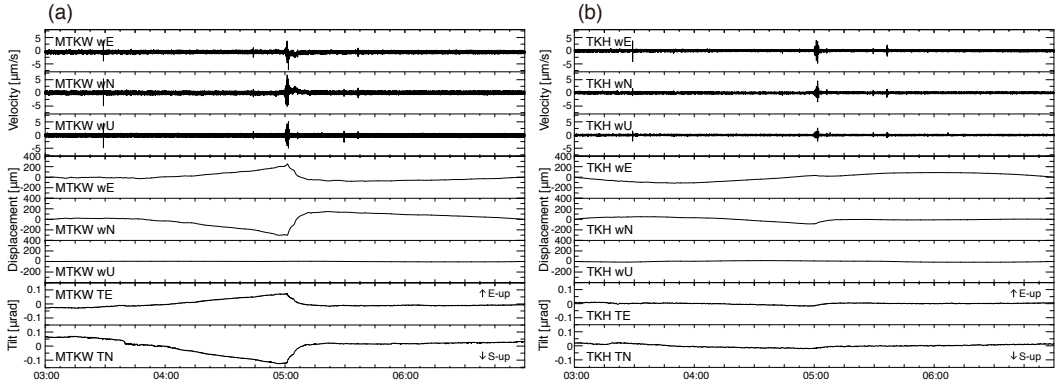

Fig. 5. Velocity and displacement seismograms and tilt change of the step-like tilt event with precursory inflation phase observed at (a) MTKW and at (b) TKH on May 14, 2018. The event occurred at around 05:00 JST.

極性となっており，この点については Fig. 4 の事例と同じである．

・緩やかな隆起変動で終わるタイプ

Fig. 6 には 2018 年 7 月 3 日 17:35 頃に発生した，火口方向の隆起変動だけで沈降がほとんど認められないイベントの例を示した．隆起変動は 20 分程度で進行し，最後の数分に変動速度が加速していることが分かる．傾斜変動はその後に僅かに反転するが，元のレベルまでは戻らず隆起成分が残った状態で終了する．傾斜変動の出現前後に発生する火山性地震は極めて小さく,「火山性地震に同期した傾斜変動」と表すよりも,「傾斜変動の前後に発生する極微小地震」と表現する方が適切であろう．この規模の火山性地震は自動トリガー処理で検知されないため，連続傾斜記録の振る舞いを精査しないとイベントの発生を認識できない．このタイプのイベントが傾斜変動イベント全体に占める割合はごく僅かである．

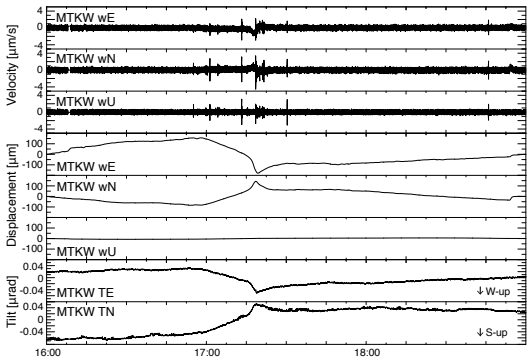

Fig. 6. Velocity and displacement seismograms and tilt change of the tilt event observed at MTKW on July 3, 2018. The event occurred at around 17:20 JST.

・複雑な時間関数を示すタイプ

当初はステップ的な傾斜変動ばかりが目に付いたが，調査を進めるとより複雑で長時間の傾斜変動イベントの発生も確認できた．ここでは興味深い変動を示した4つのイベント事例を紹介する．

Fig. 7a は 2018 年 3 月 30 日 21:03 頃から始まったイベントの波形例で，前十勝西観測点の成分だけを示す．20:55 頃に南北成分で南方向の隆起変動を示しはじめ，21:03 頃には東西成分も東方向の隆起変動を見せるようになり変動が加速した．両成分の変動はともに 21:09 頃に停止し，その後は 1 時間ほど一定の傾斜を保ったが，22:07 頃に火口方向の沈降変動を示して隆起量の 1/3 程度を回復した．「隆起」→「停滞」→「沈降」という変化に見える事例である．隆起変動開始時に南北成分に先に変化が現れるのは，圧力変動源の位置や形状といった力学過程を反映しているものと推測される．傾斜変動が始まる時刻には明瞭な火山性地震は認められず，この事例も「傾斜変動の前後に発生する極微小地震」と呼べるであろう．

Fig. 7b は 2018 年 7 月 19 日 21 時頃に観測されたイベントの波形例である．最上段の広帯域地

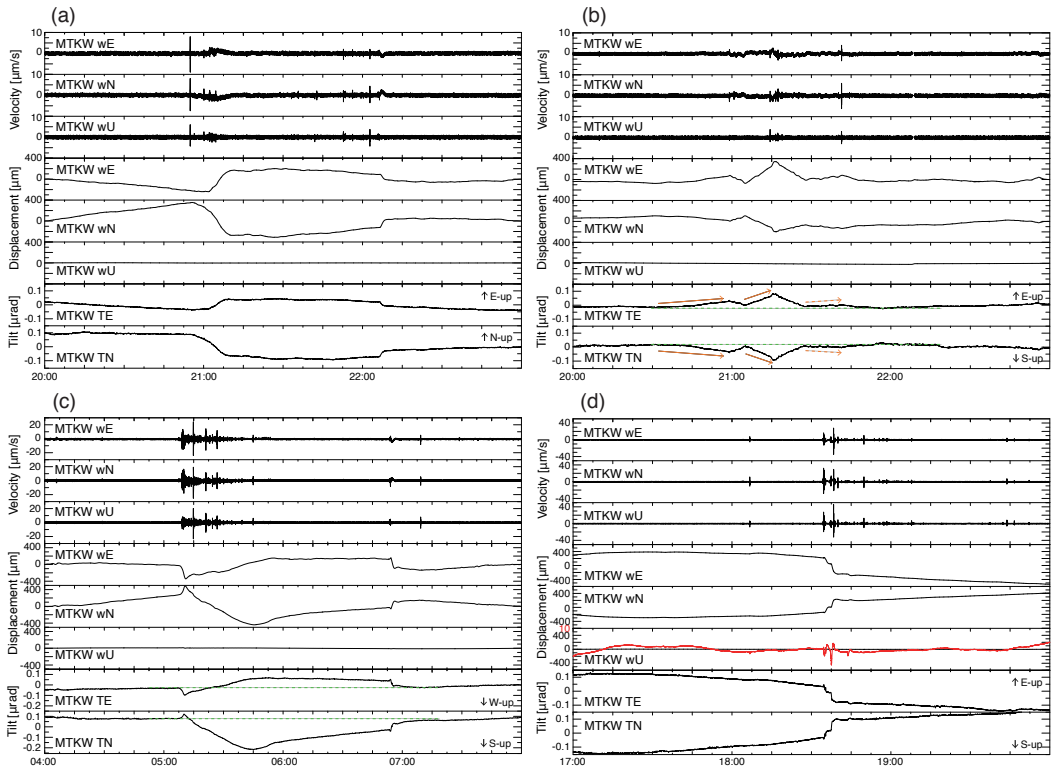

Fig. 7. Velocity and displacement seismograms and tilt change of the tilt events with complicated time function observed at MTKW. (a) The event began at around 21:00 JST on March 30, 2018. (b) The event occurred at around 20:40 JST on July 19, 2019. We can see three triangular-shape phases. The green dotted lines express the base level of tilt before and after the tilt event. (c) The event occurred at around 05:10 JST on November 22, 2019. The green dotted lines are the same as (b). (d) The event occurred at around 18:35 JST on May 29, 2018. The red trace in the UD displacement window shows the magnified waveform by 40 times in amplitude.

震計速度波形では，21:00 頃から水平動成分に長周期の揺動が現れ始め，21:40 頃に小さな火山性地震が起こるとともに揺動が収まったように見える．この記録を積分した変位波形には，複数の三角形パルスが現れる．一つ目のパルスは速度記録で認められる揺動の 30 分程度前からの緩やかな火口方向隆起と 20:59 頃から見られる 5 分程度の火口方向沈降で，二つ目のパルスは一つ目に続く 10 分程度の隆起と 10 分程度の沈降で，三つ目のパルスは，その後の 15 分程度の僅かな隆起と小さな火山性地震に同期して始まった僅かな沈降で構成される．傾斜計の波形と地震計の見かけ変位波形の対応は極めて良く，機器ノイズ等による信号ではないことが分かる．また，隆起と沈降を示すタイプ（Fig. 5）と同様に，変動の終了後には変動開始前とほぼ同じ傾斜レベルに戻っていることが興味深い．

Fig. 7c は 2018 年 11 月 22 日 05:09 頃に始まった火山性微動の際に見られたイベントの波形例である．微動開始 2 分ほど前の 05:07 頃から 3 分間ほど火口方向の沈降を示した後，05:10 過ぎに極性を反転して 05:45 過ぎまで約 35 分間の火口方向隆起を示した．この隆起変動は 0.4μrad を超える振幅であった．その後は南北成分が緩やかに元へ戻るような変化を示しつつも 1 時間程度は変動が止まった状態であったが，06:54 のごく小さな地震と同時に火口方向のステップ的沈降を示した．「沈降」→「隆起」→「停滞」→「沈降」という複雑な推移を示した傾斜イベントにもかかわらず，06:54 のステップ的沈降の後には 05:07 以前の傾斜レベルへほぼ戻っている．

Fig. 7d は 2018 年 5 月 29 日 18:33 頃に発生したイベントの波形例である．イベントを挟む 3 時間の記録しか示していないため前後の動きには言及できないが，18:33 頃から数段階で傾斜変動が進行したことが分かる．傾斜変動のステップが発生するタイミングで小さな火山性地震が発生し，傾斜変動が終わった後に微小地震活動が高まったように見える．広帯域地震計の上下動成分について，振幅を 40 倍に拡大した変位波形を赤色で示した．これを見ると複数段の傾斜ステップが発生するタイミングで，前十勝西観測点では下向きの変位パルスが現れていることが分かる．この傾斜イベントを契機として，本節で紹介してきたような数分から数時間単位の微小傾斜変動イベントの発現回数が増大した．これについては，議論の項で再度言及する．

2. 前十勝西観測点で数 μrad の振幅を示す隆起と沈降

2019 年 11 月 1 日に，前十勝西観測点（MTKW）の傾斜計で顕著な火口方向（南東方向）の隆起が観測された．Fig. 8a には 2019 年 10 月 1 日から 11 月 30 日までの旭川アメダスの風速と気圧，前十勝西観測点の傾斜変化，バンドパスフィルター（透過帯域：120 秒 – 15 秒）を施した 3 成分の変位波形，および上下動の速度波形を示した．11 月 1 日に現れた隆起変動量は 4μrad 超におよぶ．このイベントは，1 日程度継続する火口方向の隆起を示したあと，その状態でおよそ 3 日を経過し，11 月 5 日の 04:00 過ぎに明瞭な震動イベントを伴わず急速な沈降に転じた．沈降変動後の傾斜計出力は 11 月 1 日の隆起前とほぼ同程度となっており，「隆起」→「停滞」→「沈降」の過程を経て元へ戻ったように見える．火口方向の隆起が始まるのと時期を同じくして，11 月 1 日頃から 6 日頃にかけて山体浅部の B 型地震活動が活発になった．Fig. 3 に見られる 2019 年 11

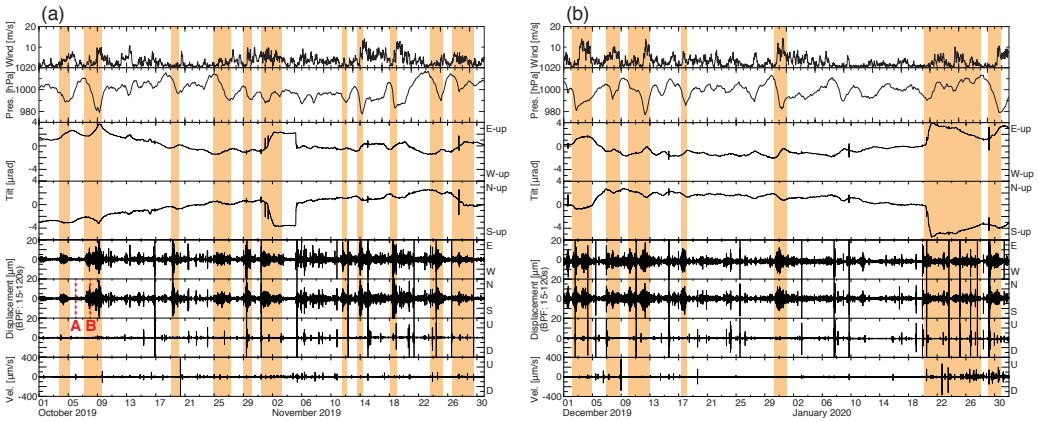

Fig. 8. Long-term changes of wind speed and air pressure of Asahikawa AMEDAS, tilt, band-passed displacement seismogram and vertical ground velocity of MTKW. (a) shows the period from October to November 2019 and (b) shows the period from December 2019 to January 2020. The shaded periods express the time window of large amplitude oscillation in horizontal displacement traces. A and B in (a) will be referred in Fig. 9.

月の地震回数の増大は，このイベントに関連した地震活動の高まりを反映している．11 月 5 日の火口方向の沈降変動は数時間で進行し，隆起変動に比べて時定数が短い．変動が最大変化率を示す時間帯に，検測基準未満のごく小さな火山性微動が発生した．前十勝西観測点に設置している空振計は，凍結のためと思われる障害により正常な記録が得られていない．また，当日を含む数日間は山頂域が雲に覆われていたため，イベント前後の火口の様子は確認できなかった．

2020 年 1 月 20 日には，似たような火口方向の隆起変動が再び認められた．Fig. 8b には 12 月 1 日から 1 月 31 日までの記録を示す．10:00 頃から始まった変動は，12:00 頃から急加速して 1μrad 以上の隆起変動を示した後，12:48 頃に急速に反転し 14:30 頃までに 0.6μrad 程度は元へ戻った．しかし，再び火口方向の隆起が始まり，1 月 21 日の 05:00 過ぎまでの 19 時間で 6.8μrad の隆起変動を示した．隆起変動の後は 1 月 28 日 10:00 頃まで緩やかで直線的な沈降変動が継続した．このイベントでも 11 月の事例と同様に，B 型地震活動の活発化が認められた（Fig. 8b 最下段の上下動速度波形）．また，1 月 20 日 12:48 頃の傾斜反転直前には，振幅の大きな火山性微動とそれに重なる長周期の振動が認められた．

以上 2 つのイベントは，前節で紹介した短時間の微小傾斜変動に比べると，変動の振幅が 1 桁以上大きい上に，継続時間が 1 日から数日程度と長い．そのため，Fig. 8a と 8b の記録では，特に紹介した 2 つのイベントによる変動が目に留まる．しかしながら，その他の時期においても，傾斜計の信号は数日程度の周期かつ 1-2μrad 程度の振幅で揺らいでいるように見える．旭川アメダスによる気圧観測値と比べると，この揺らぎは大気圧変化に応答した変動であり，気圧低下時に南東方向が隆起する傾斜変動を描いていることが分かる．旭川と十勝岳では経緯度や標高が異なるものの，大雑把には 10hPa の大気圧変化に対して 1μrad 以下程度の傾斜応答を示しているようである．

3. 前十勝西観測点での周期 100 秒以上の超長周期水平振動

Fig. 8 には，広帯域地震計に 15 秒から 120 秒のバンドパスフィルターをかけて積分した変位波形 3 成分も示した．上下動変位には地震によるパルス状の変動しか見えないが，水平成分には紡錘形的な振幅の増減が認められる．振幅が大きくなる時間帯に目視で色づけしてみると，気圧が低下していく時間帯に対応しているようにも見えるが，必ずしも同期して発生しているわけではない．水平成分の振動の小さい時間帯（Fig. 8a 中の“A”の時間）と大きい時間帯（同“B”の時間）のそれぞれ 1 時間分の速度振幅スペクトルを Fig. 9a と Fig. 9b に示した．Fig. 9b より，地震計の透過帯域下限付近の周期 100 秒（0.01Hz）程度から 500 秒（0.002Hz）程度の帯域に有意なスペクトルの高まりがあり，この振動は周期数百秒程度の超長周期の成分で構成されていることが分かる．Fig. 9b の時間帯の変位波形の振動軌跡を Fig. 9c に示した．これを見ると，振動方位は N35° W–N45° W の範囲に偏在しているようである．

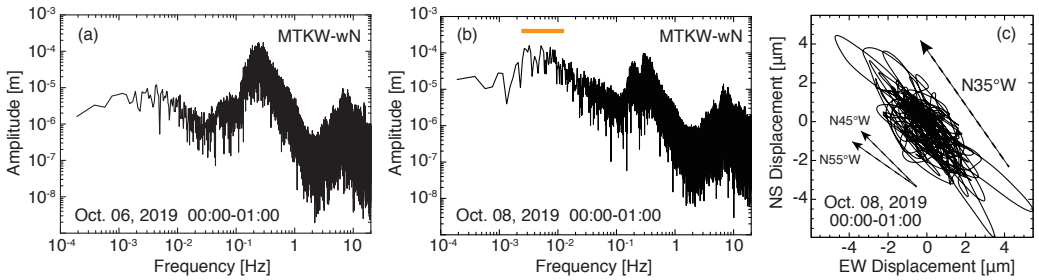

Fig. 9. (a) Velocity amplitude spectrum of NS component seismogram at MTKW. The data window is 00:00 – 01:00 JST on October 6, 2019, which is indicated by “A” in Fig. 8a. (b) Same as (a) but the data window is 00:00 – 01:00 on October 8, 2019, which is indicated by “B” in Fig. 8a. We can see the broad amplitude rise in the 0.002 – 0.01 Hz band. (c) Horizontal displacement particle orbit in the time window in (b).

4. 規則的に繰り返す微小地震群

2018 年 12 月 7 日 06:20 頃から 08:03 頃にかけて，火口近傍の浅い部分が震源域と考えられる微小地震の群発活動があった．およそ 1 時間 45 分の間に 400 回を超える地震が確認でき，数秒から十数秒おきに規則的に繰り返すという変わった特徴を示す（Fig. 10）．札幌管区気象台でも，1997 年に避難小屋東観測点（V.TOKH）を設置してから Fig. 10 に示したような規則的な微小地震群発イベントは恐らく初めてとのことで，以後も監視現業で発見に努めていただいた結果，2020 年 1 月末までに大小あわせて 15 回の類似群発イベントの発生が確認された（札幌管区気象台地域火山監視・警報センター私信，2020）．特に 2019 年 5 月には，3 日，6 日，7 日，8 日，12 日，18 日と立て続けに発生した．また 2019 年 12 月 30 日の群発イベントは，他の事例が比較的高周波を含む地震群で構成されるのに対し，1–2Hz でパルス状の波形が繰り返されるという異なる特徴を示した．ここでは 15 回の類似群発イベントのうち，含まれる地震群の規模が大きかっ

た 2018 年 12 月 7 日の事例（Fig. 10）について紹介する．

同一の群発イベントに属する微小地震の波形は互いに似ているため，ここでは前十勝西観測点（MTKW）の上下動速度波形に 1Hz のハイパスフィルターをかけたあと，Fig. 10 に①で示した地震をテンプレートとして連続データの中から相関の高い地震を抽出した．この相関処理で抽出できた地震の総数は 398 個であり，Fig. 10 に色つき網掛けで示した地震が該当する．地震群の出現間隔や波形変化に基づき，第 1 から第 6 のグループ（群）に区分（色分け）している．これらの地震全てに対し総当たりで調べた地震間の波形相関度合い（相関マトリクス）を Fig. 11 に示す．第 1 群，第 4 群，第 6 群は同一グループの中での波形相関が高い一方で，第 2 群，第 3 群，第 5 群はグループ内でも相関が高くない．第 2 群については個々の地震の振幅が小さく S/N が良くないことが相関の低さに影響している可能性があるものの，第 3 群と第 5 群については S/N が

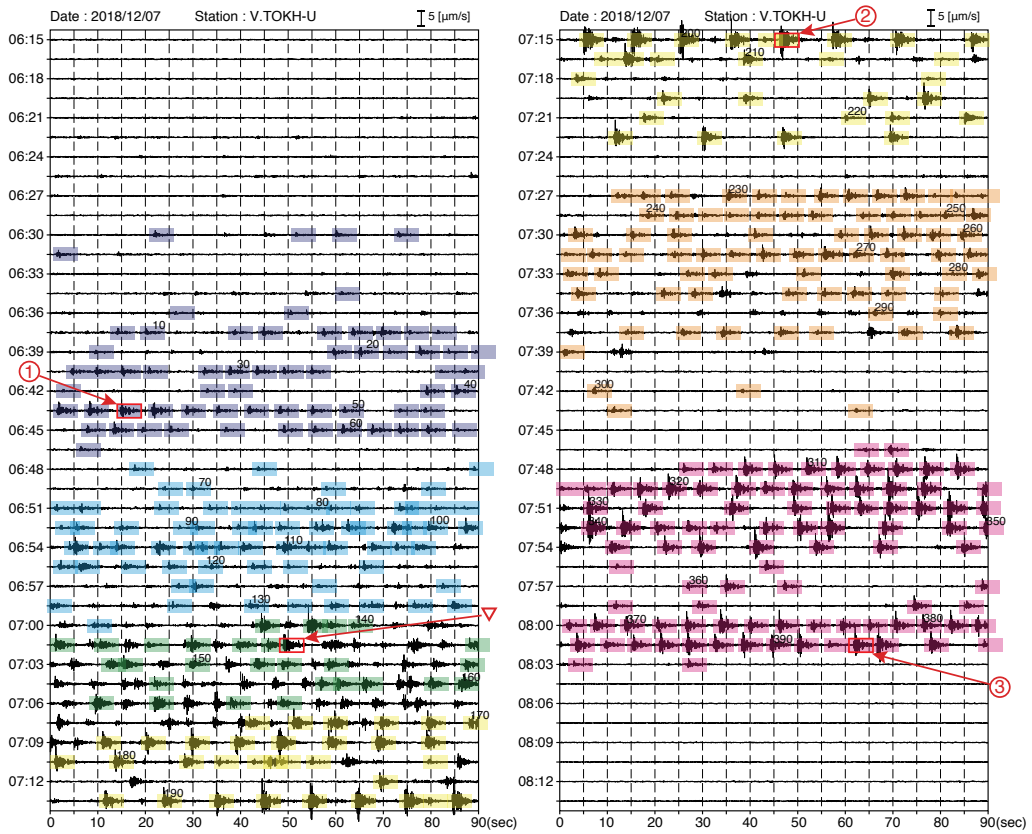

Fig. 10. Two-hours-long seismogram containing trains of micro-earthquakes observed on December 7, 2018. This data was obtained at V.TOKH. The color shades indicate the events automatically identified by the waveform correlation and the black integers correspond to the event number of the identified earthquakes in Fig. 11. The colors mean the event groups referred in Fig. 11. The red circled numbers and inverted triangle indicate the events shown in Fig. 12.

良くても網掛けのない地震が Fig. 10 中に多いことからもわかるように，1 時間 45 分程度の活動の間に波形変化があったことを示している．また第 1 群，第 4 群，第 6 群の間の相関を見ると，第 1 群と第 6 群の間の相関は高いが，第 4 群は他の群との相関はさほど良くない．波形相関で抽出できなかった第 3 群などの S/N の良い地震も含むよう，振幅の絶対値を基準として地震を抽出した場合についても同様の相関マトリクスを作成してみたが（抽出数 499 個），上に述べた傾向は変わらなかった．

最後に，Fig. 10 中に①から③で示した抽出された地震と，▽で示した抽出できなかった地震の 3 成分波形例を示す(Fig. 12)．上下動波形は明瞭なパルスに続く後続相を持ち，抽出できなかったイベントも含めて全体の特徴は似ているように見える．水平動でも主要なパルスは各地震に共通して認められるようだが，高周波成分では違いが目立つ．基本的な発震機構は共通であると考えられるが，発震機構や震源位置が少しずつ変化しているのだろう．このように規則的に繰り返

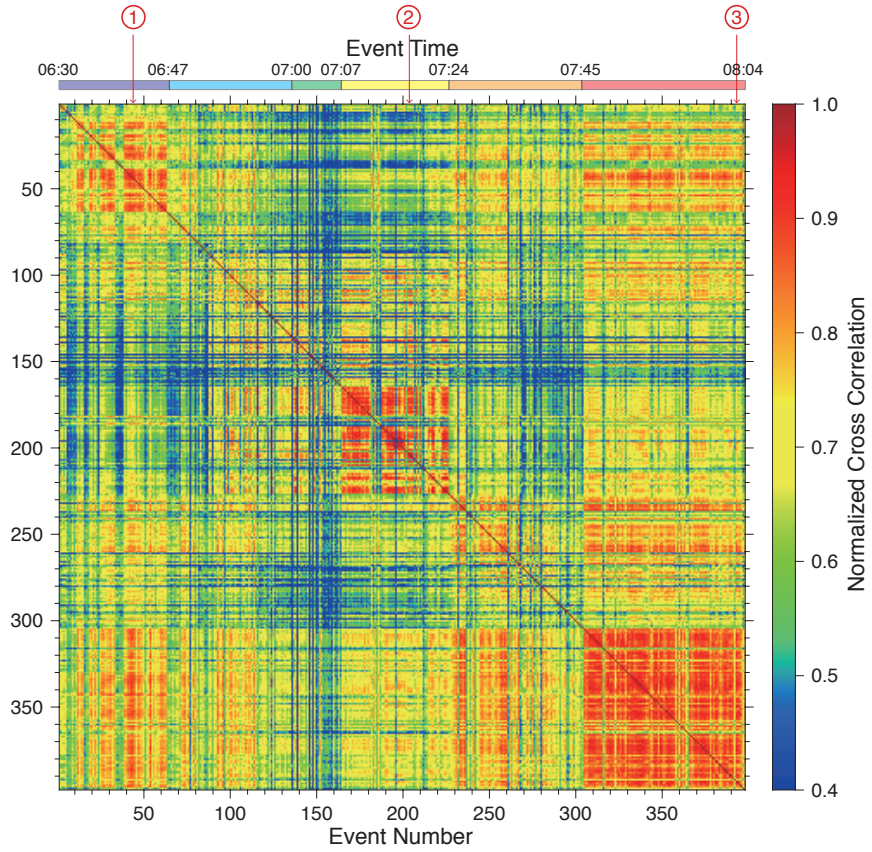

Fig. 11. Correlation matrix of the all shaded events in Fig. 10. The color bar on the right side gives the correlation value between the seismic events. The horizontal color bar on the top expresses the event groups and the rough timing of group discrimination. Three red integer numbers indicate the time of the same numbered events in Fig. 10.

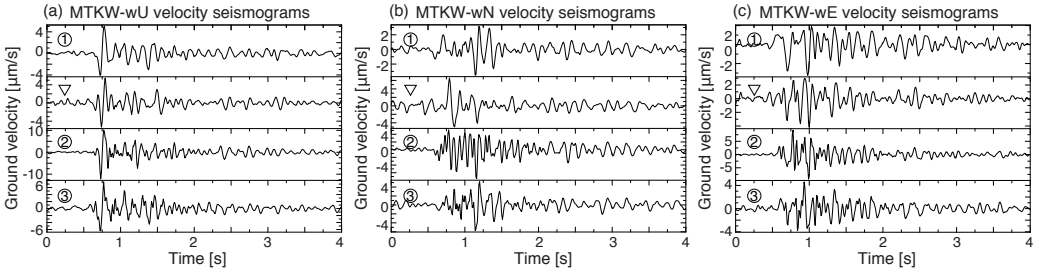

Fig. 12. Waveform comparison of 4 earthquakes indicated in Fig. 10. The event with an inverted triangle was excluded by the automatic event identification due to low waveform correlation.

す火山性地震の発生は，溶岩ドームの成長が見られる火山などでは報告があり，ドーム成長に伴う固着すべりなどで解釈されている（例えば，Iverson et al., 2006）．一方，十勝岳のような噴気や熱水活動が卓越している火山における，このような周期性を示す火山性地震の発生は他に例を知らない．地震以外の観測項目には特段の変化が見られておらず，火山活動との関係や発生メカニズムについては不明である．

V．議　　論

1．前十勝西観測点で観測される傾斜変動

前章で述べたように，2016 年 10 月に前十勝西観測点（MTKW）の運用を始めたことで，大小様々な傾斜変動イベントが検出されるようになった．特に 2018 年 5 月 29 日に発生したイベント（Fig. 7d）をきっかけに，微小傾斜変動イベントの活動度が増大した．そこで，時間的な活動の盛衰や変動の特徴をつかむために，2018 年 1 月 1 日から 2019 年 2 月末までの前十勝西観測点の傾斜計と広帯域地震計の連続記録を目視で確認し，明らかに微小傾斜変動イベントと判断できるものについて，傾斜ベクトルの方向，大きさ，継続時間や同期する地震動の有無などを調べた．確認できた微小傾斜変動イベントの総数は 195 回で，発生日時と変動量を Fig. 13a にまとめた．

Fig. 7c に示した 2018 年 11 月 22 日のイベントの振幅がひときわ大きく目立つ一方で，全体的には変動量が 0.1μrad 以下の小さいイベントが多い．2018 年 9 月には台風によるアンテナ脱落障害により前十勝西観測点は 1 ヶ月ほど欠測となったが，それ以外の期間はおおよそデータが揃っており，0.02μrad 程度より振幅の大きいイベントはほぼ検出できているであろう．Fig. 13a を見ると，2018 年 1 月と 2 月の 2 ヶ月や，2019 年 1 月上旬から 2 月上旬までのおよそ 1 ヶ月は発生が極めて少ない．一方で，5 月 29 日（Fig. 7d）に 0.2μrad 近いイベントが発生したあと，6 月に入ると発生数が急増していることが分かる．2018 年 11 月下旬や 12 月下旬にもまとまって発生しており，1 年 4 ヶ月の間に活動期と静穏期があるようにも見える．Fig. 13b には抽出した 195 回の傾斜変動イベントにおける，沈降ベクトルの方位頻度分布を示した．N130°E から N150°E

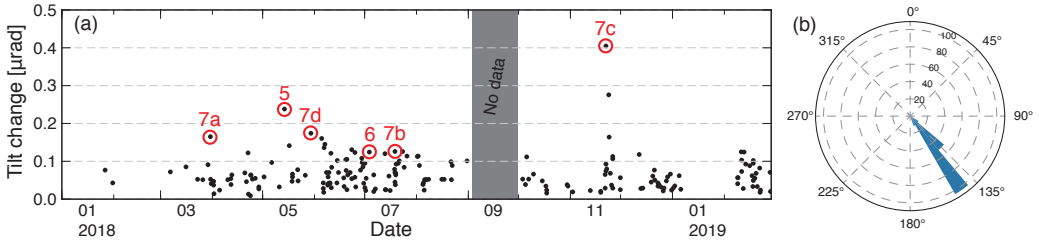

Fig. 13. (a) Temporal evolution of the tilt amplitude of the small tilting events observed at MTKW from January 2018 to February 2019. The red numbers indicate corresponding numbers of the figures showing observed waveforms. (b) Histogram of down-dipping azimuth associated with the small tilting events.

方向の沈降（N30° W から N50° W 方向の隆起）を示す傾斜変動が全体の 7 割近くを占めている．Fig. 14 には 2018 年 3 月 30 日（Fig. 7a），2018 年 5 月 14 日（Fig. 5），2018 年 11 月 22 日（Fig. 7c）の傾斜変動イベントについて，傾斜ベクトルの変動軌跡を示した．Fig. 14a と Fig. 14b のイベントでは，N35° W（もしくは N145° E）方向へ直線的に変化している．一方で，Fig. 14c のイベントは他の 2 例とは異なる方向への傾動を示す．同程度の変動量を示す傾斜イベントであっても，変動源の位置や形状は必ずしも同一ではない可能性が示唆される．

より長い期間での傾斜ベクトルの変動軌跡を Fig. 15 に示した．Fig. 15a は 2019 年 11 月 1 日からの傾斜イベントを含む 10 月 1 日から 11 月 30 日の 2 ヶ月間（Fig. 8a の期間），Fig. 15b は 2020 年 1 月 20 日からの傾斜イベントを含む 12 月 1 日から 1 月 31 日の 2 ヶ月間（Fig. 8b の期間）の変動軌跡である．これらの図にも特徴的な 2 つの傾斜変動方向が認められる．1 つは N35° W（もしくは N145° E）方向への変動で，11 月 1 日や 5 日，1 月 20 日に見られた数 μrad 規模の傾斜変動時に現れている．Fig. 15 をよく見ると，11 月 25 日から 12 月 2 日頃にかけても 3μrad 程度の N35° W-N145° E 方向の傾斜変動（火口方向の隆起変動）が発生し，12 月 5 日頃から 7 日頃にかけて火口方向の沈降変動があったことも確認できる．傾斜変動の進行が時間的に緩やかであるためイベントとして認識しづらいが，11 月 25 日から 12 月 7 日までの変動ベクトルの方向からすると，11 月 1 日や 5 日，1 月 20 日のイベントと同じ変動源を起源とするような傾斜変動イベントがあったと考えるべきであろう．もう 1 つは N55° W（もしくは N125° E）方向への変動で，Fig. 8 を参照すると数日程度の時定数を持つ気圧変動への応答として現れる変化であることが分かる．N55° W は前十勝西観測点がある地形斜面の最急下り勾配の方向であることから，地形的な要因が傾斜計の気圧応答に影響を与えている可能性も考えられるが，気圧変動への応答特性は今後の検討課題である．

Fig. 13 にまとめた微小傾斜変動の中でも振幅の小さなイベントは，先行相の有無はあるものの火口方向下がりを示すステップ的な変動で終わる事例（例えば Fig. 4）が多い．活発な噴気活動が定常的に見られることを考慮すれば，山体の浅い部分にある噴気流路の一時的な狭窄（先行相の緩やかな火口方向の隆起）と再開口（ステップ的な火口方向の沈降）で解釈できるのかもし

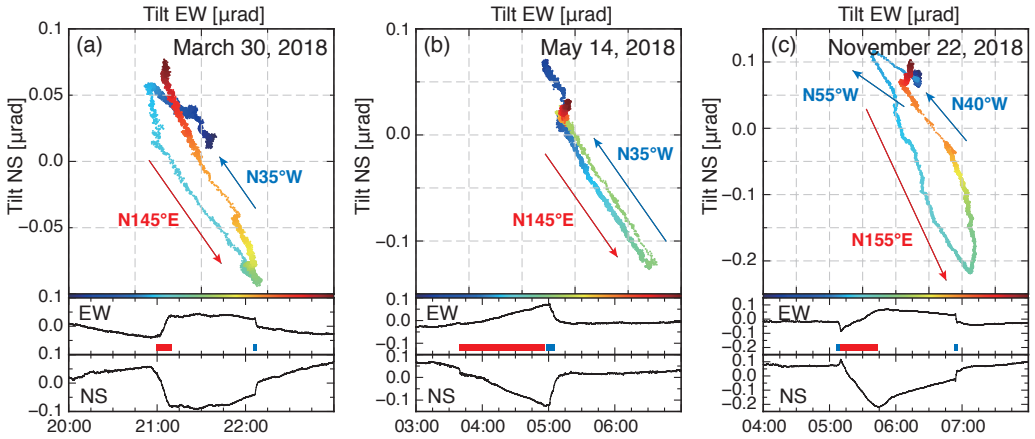

Fig. 14. Temporal change in tilt angle projected on the horizontal plane and corresponding tilt traces of small tilt events observed at MTKW. (a) The event on March 30, 2018, shown in Fig. 7a. (b) The event on May 14, 2018, shown in Fig. 5. (c) The event on November 22, 2018, shown in Fig. 7c. Red and blue horizontal bars in the tilt trace window express the tilt event periods. Corresponding parts in the tilt angle projection are indicated by the colored arrows with their azimuthal value.

れない．仮にそうだとすれば，傾斜イベントの前後で噴気量や大気圧などに変動があっても良いが，十勝岳では現在のところ傾斜変動に対応した表面現象は確認できていない．

似たような火口方向の沈降変動は，吾妻山の大穴火口近傍の浄土平観測点などで報告されている（例えば，気象庁，2019a）．さらに吾妻山では，2019 年 11 月 1 日から観測されたイベントと似たような数日間での顕著な隆起・沈降変動も 2019 年 5 月に観測されるなど（気象庁，2019a），十勝岳とよく似た特徴を示す力学現象が多い．本節で議論したような傾斜変動イベントは，活発な噴気活動が見られる火口の近傍では普遍的に起こっている現象なのかもしれない．

2. 前十勝西観測点の超長周期水平振動

前十勝西観測点（MTKW）の広帯域地震計水平成分にしばしば現れる超長周期の振動については，すでに Fig. 8 や Fig. 9 に示してきた．地震計の超長周期振動の方向は Fig. 9c に示したように N35°W から N45°W の間を指し，Fig. 15 に示したような大気圧変化に呼応した数日程度の時定数を持つ傾斜変動の方向（N55°W）とは明らかに一致しない．超長周期振動の周期が気圧変化の時定数と 4 桁程度異なることからも，振動の原因を単純な地盤の気圧応答に求めることには無理があろう．

仮に地震記録に現れる周期数百秒の水平動が何らかの傾斜変動の結果として表れているならば，併設している傾斜計で地震記録に同期した信号の振幅変化が記録されていてもよい．Fig. 16 には Fig. 9b でスペクトルを示した時間帯の水平動変位地震波形と傾斜記録を示す．傾斜計の分解能が 1nrad であるため，傾斜記録のノイズが大きく見えている．同一成分の波形を比べると，個々の振動には違いがあるものの大局的にはよく似ている．地震計の見かけ変位量から傾斜量への変

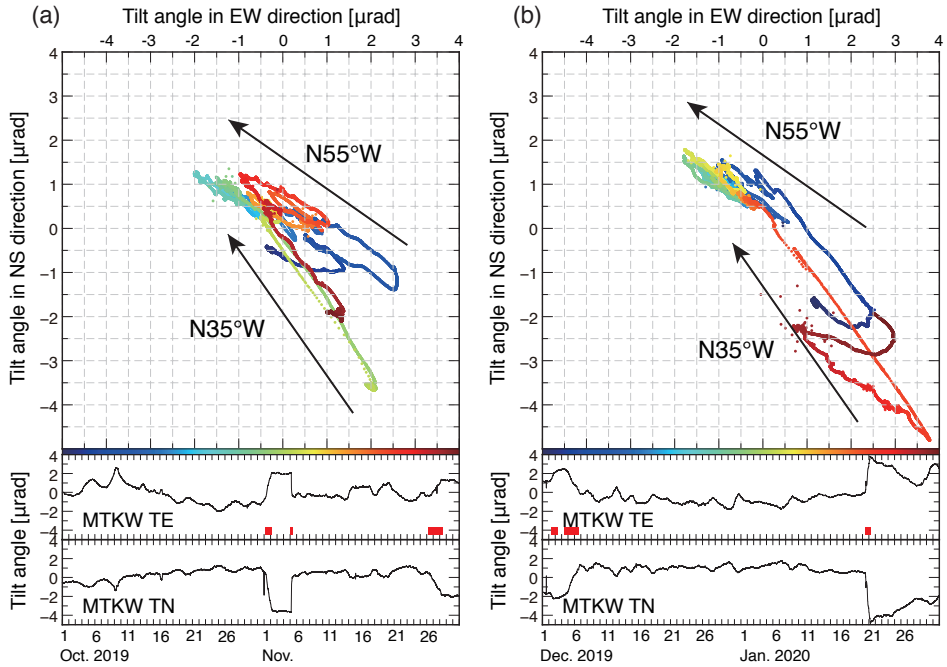

Fig. 15. Long-term change in tilt angle projected on the horizontal plane and corresponding tilt traces at MTKW. (a) shows the period from October to November 2019 and (b) shows the period from December 2019 to January 2020. Red horizontal bars in the tilt trace window express the tilt event periods showing the direction of N35° W – N145° E.

換係数（Trillium Posthole では 4.3378mm/μrad）を用いて表した傾斜振幅を地震波形の右側に示したが，振幅についても変位波形と傾斜記録は整合的であることが分かる．これより，地震計の水平成分に現れている超長周期振動は，傾斜計の検出下限に近い極小な振動性の傾斜変動によるものと考えられる．他火山の観測事例も含め，このような振動性の傾斜変動を観測をしたという報告は著者の知る限り他にない．

この振動性の傾斜変動には明瞭な出現と消失が認められ，気圧が低下する時間帯に選択的に現れているようにも見えると述べた（Fig. 8）．たかだか 30hPa 程度の気圧変化が周期数百秒程度の地盤変動を引き起こす物理機構について，現時点で明確なアイデアはない．気圧低下時に現れるという特徴から，例えば，火口近傍の比較的浅い部分に滞留しているであろう熱水の相変化に関係している可能性が考えられる．気圧低下により熱水の気化が一時的に促進され，その相変化や蒸気の流出に伴う圧力擾乱が振動性の傾斜変動として観測されるという仮説である．しかしながら，数 MPa と想定される熱水圧力に対する気圧低下量が極めて小さいため，観測できるような擾乱が生じうるかは疑わしい．

N35° W から N45° W という変動方向は，Fig. 13 や Fig. 14 に示した微小傾斜変動イベントで見られる傾斜方向に相当するほか，11 月 1 日と 5 日や 1 月 20 日の数 μrad 規模の傾斜変動イベン

トの傾斜方向ともほぼ共通している．とは言え，これらの時定数や振幅スケールの異なる様々な傾斜変動イベントは時間的に重なって発生することもあり，単一の変動源で説明することは難しいように思われる．具体的な発生メカニズムを考えるためには，本論で扱えなかった期間のデータについても出現時期や振動特性を追跡し，傾斜ベクトルのばらつきや類似性について定量的に検討を進めることが大事である．

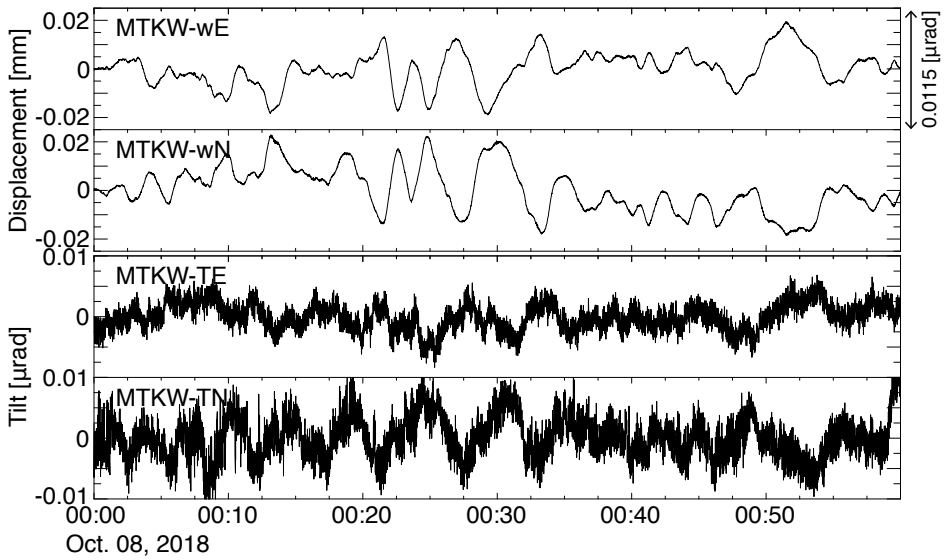

Fig. 16. Horizontal displacement seismogram and tilt trace of one hour during the micro oscillating tilt period indicated by “B” in Fig. 8a. The value in the right upper gives the tilt angle equivalent of the apparent displacement obtained by the displacement – tilt angle conversion factor of the Trillium Posthole of 4.3378mm/μrad.

Ⅵ. ま と め

2014 年から進めてきた十勝岳の観測施設の強化によって，活動火口の近傍に広帯域地震計や傾斜計が整備されたことにより，それまでは観測できなかったような大小様々な傾斜変動イベントが確認されるようになった．特に前十勝西観測点の整備は傾斜変動イベントの把握に大きく寄与していて，小規模なイベントや長い時定数を持つイベントは前十勝西観測点だけでしか信号が確認できない．

前十勝西観測点で観測された傾斜変動イベントは，①広帯域地震計の水平成分に顕著に表れる周期数百秒程度の振動性の極小傾斜変動，②広帯域地震計と傾斜計の双方でイベントとして認識できる微小傾斜変動，③長期の傾斜計記録でも顕著に認識される傾斜変動，と大きく 3 つのタイ

プに分けられる．①の極小傾斜変動は数 nrad 程度の振幅を持ち，気圧変化に呼応して出現・消失しているようにも見える．傾斜の振動方向は N35°W から N45°W の間を指す．②の微小傾斜変動は数十 nrad から数百 nrad 程度の振幅を持つ．火口方向のステップ的な沈降を示すイベントが多いが，振幅の大きなイベントでは複雑な時間関数を示すものもある．③の傾斜変動は長期の傾斜記録の中でも認識できる数 μrad の振幅を持つ．2019 年 11 月 1 日から 5 日や 2020 年 1 月 20 日に発生が確認されたほか，2019 年 11 月 25 日頃から 12 月 7 日頃までにも一連の活動と思われる変動が認められた．これらの現象は火口近傍の浅い部分における何らかの圧力変動を反映していると考えられ，例えば②のタイプに含まれるステップ的な火口方向の沈降を示すイベントは，一時的な噴気流路の狭窄と再開口で解釈できる可能性がある．しかしながら，いずれのタイプの傾斜変動イベントも遠望カメラでの噴気量や空振計データなどに特段の変化は認められず，表面現象との対応付けができないことから発生メカニズムについては議論が難しい．このほか，2018 年 12 月 7 日からは規則的に繰り返す相似地震群からなる微小地震活動がしばしば見られるようになった．活発な噴気活動を示す非噴火時の火山では同様な群発地震の観測報告はなく，極めて珍しい現象と考えられる．出現のタイミングと火山活動との関連もよく分からず，こちらも発生メカニズムを議論するには至っていない．いずれも今後の課題である．

謝辞　札幌管区気象台地域火山監視・警報センターの皆さまには，日頃から十勝岳の活動についてご議論いただくとともに，地震回数や噴煙高度等のデータを提供していただいた．北海道立地質研究所には，前十勝 GNSS 観測の解析結果を提供していただいた．本解析で用いた PALSAR-2 データは，火山噴火予知連絡会が中心となって進めている防災利用実証実験（衛星解析グループ）に基づいて，宇宙航空開発機構（JAXA）にて観測・提供されたものである．また，一部のデータは，PIXEL で共有しているものであり，JAXA と東京大学地震研究所の共同研究契約により JAXA から提供されたものである．PALSAR-2 に関する原初データの所有権は JAXA にある．PALSAR-2 の解析ソフトウェアは，防災科学技術研究所の小澤拓氏により開発された RINC を使用した．また，処理の過程や結果の描画においては，国土地理院の数値地図 10m メッシュ（標高）を元にした DEM を使用した．図の作成には Generic Mapping Tools（Wessel and Smith, 1998）を使用した．深く感謝いたします．

文　献

青山　裕，2008．CMG40T 地震計の傾斜応答に関する簡易試験，火山，53，35-46．

橋本武志・西村三治・有田　真・山本輝明・小木曽仁・重野伸昭・岡崎紀俊・茂木　透，2010．十勝岳の全磁力変化と蓄熱過程（2008-2009 年），北大地球物理学研究報告，73，269-280．doi：10.14943/gbhu.73.269.

井口正人，1989．火山性地震 BL・BH の初動の押し引き分布，京大防災研年報，32，B-1，13-21．

石塚吉浩・中川光弘・藤原伸也，2010．十勝岳火山地質図（火山地質図 No.16），地質調査総合センター．

Iverson, R. M., D. Dzurisin, C. A. Gardner, T. M. Gerlach, R. G. LaHusen, M. Lisowski, J. J. Major, S. D. Malone, J. A. Messerich, S. C. Moran, J. S. Pallister, A. I. Qamar, S. P. Schilling, and J. W. Vallance, 2006. Dynamics of seismogenic volcanic extrusion at Mount St Helens in 2004 – 05, *Nature*, 444：23. doi：10.1038/nature05322.

気象庁，2013．日本活火山総覧（第 4 版）．

気象庁，2019a．第 144 回火山噴火予知連絡会資料（その 1）．

気象庁，2019b．第 145 回火山噴火予知連絡会資料（その 5）．

Mildon, Z. K., D. J. Pugh, J. Tarasewicz, R. S. White, and B. Brandsdóttir, 2016. Closing crack earthquakes within the Krafla caldera, North Iceland, *Gophys. J. Int.*, 207, 1137-1141. doi:10.1093/gji/ggw325.

Mori, T., K. Kazahaya, C. Oppenheimer, C., A. J. S. McGonigle, V. Tsanev, R. Olmos, M. Ohwada, and T. Shuto, 2006. Sulfur dioxide fluxes from the volcanoes of Hokkaido, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 158, 235-243. doi:10.1016/j.jvolgeores.2006.04.024.

Tanaka, R., T. Hashimoto, N. Matsushima, and T. Ishido, 2017. Permeability-Control on Volcanic Hydrothermal System: Case Study for Mt. Tokachidake, Japan, Based on Numerical Simulation and Field Observation, *Earth Planets Space*, 69:39. doi:10.1186/s40623-017-0623-5.

卜部 卓，1994．多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案，日本地震学会講演予稿集，NO.2，A25．

Wessel, P, and W. H. F. Smith, 1998. New, improved version of generic mapping tools released, *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 79, 579, doi:10.1029/98EO00426.