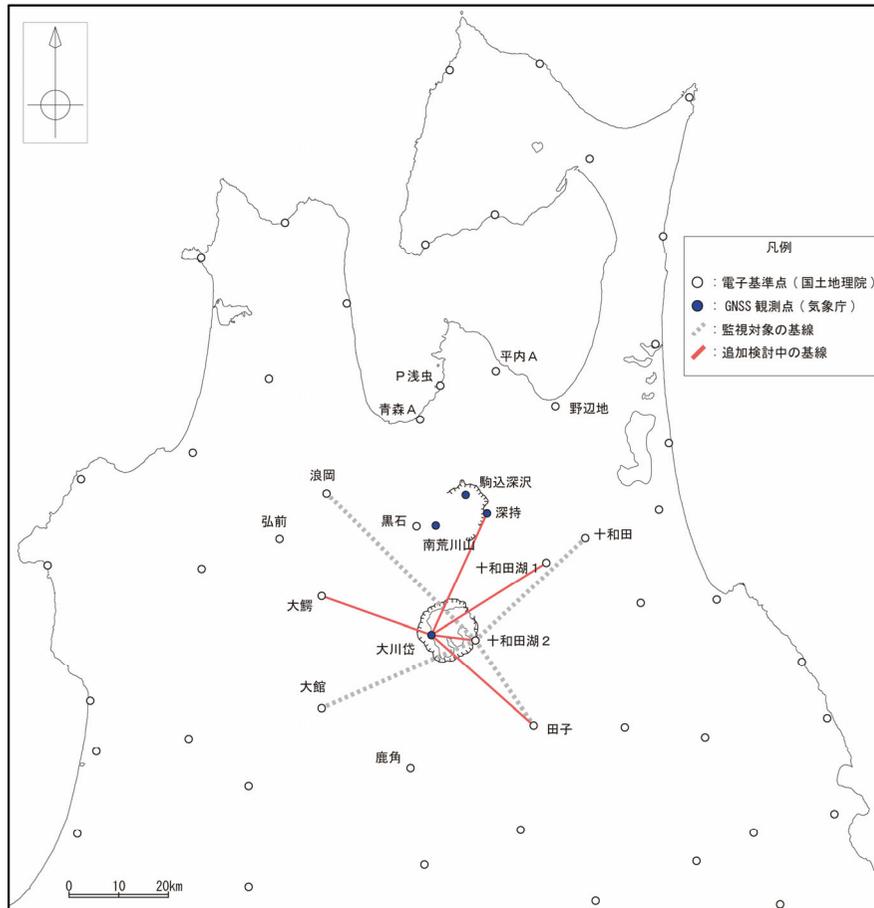


## 6. 中・長期的取組み

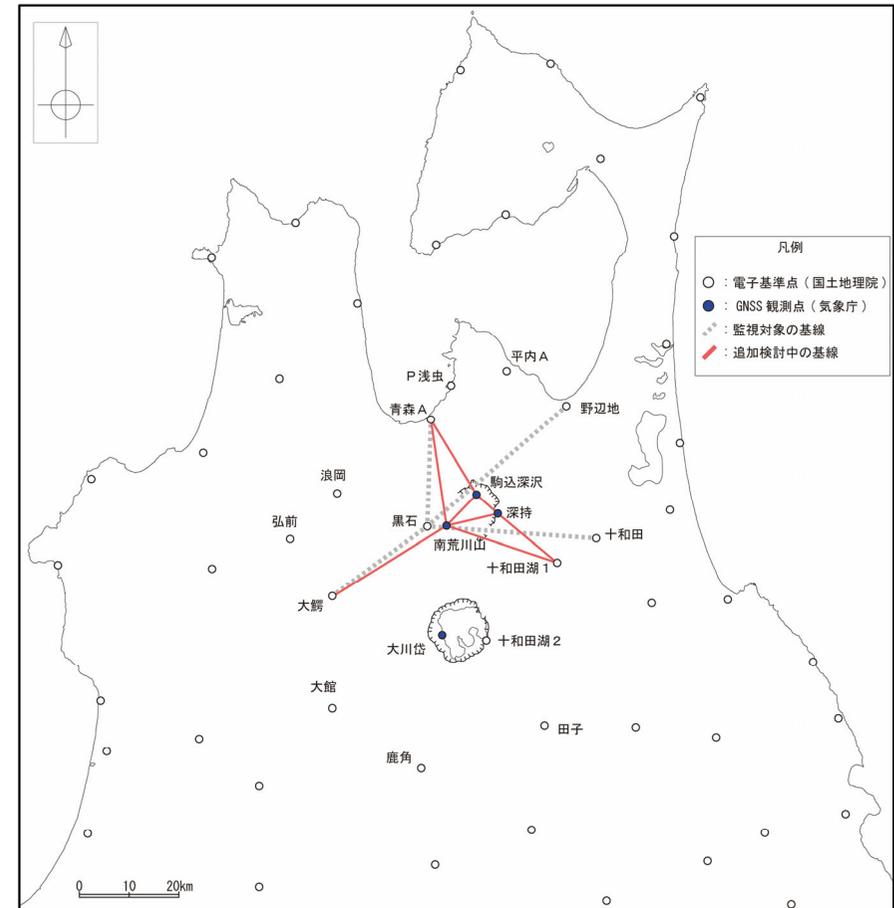
## 6.1 気象庁観測データの導入(GNSS)

### [気象庁GNSS観測点を取り入れた地殻変動観測基線の追加]

- これまでの当社による十和田及び八甲田山の地殻変動観測に用いていた基線は、国土地理院の電子基準点のうち、十和田及び八甲田山の近傍(それぞれ電子基準点「十和田湖2」及び「黒石」)を中心に、それぞれ麓の4点を用いた4基線としていた。
- 監視精度の向上を目的に、十和田及び八甲田山の近傍に気象庁が設置しているGNSS観測点を用いた地殻変動観測基線を追加した。
- 今回は、防災科学技術研究所によるJapan Volcanological Data Network(JVDN)より、気象庁のGNSS観測点(大川岱, 深持, 駒込深沢, 南荒川山)の解析データを取得するとともに、国土地理院の電子基準点データ(F5解)を用いて基線を構築し、基線長及び比高を算出した。
- 2023年度の評価時には、各基線に対して判断基準を設定することとする。

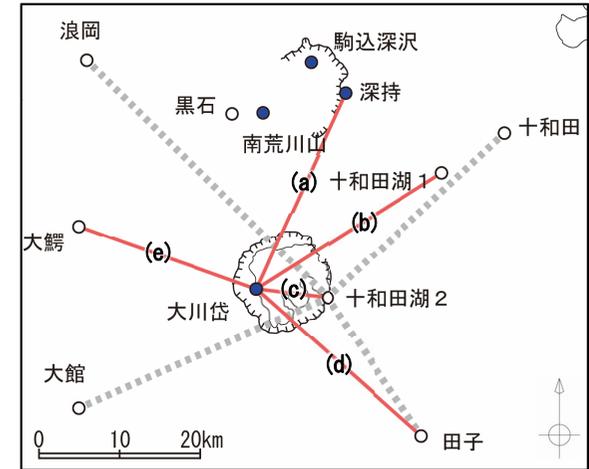
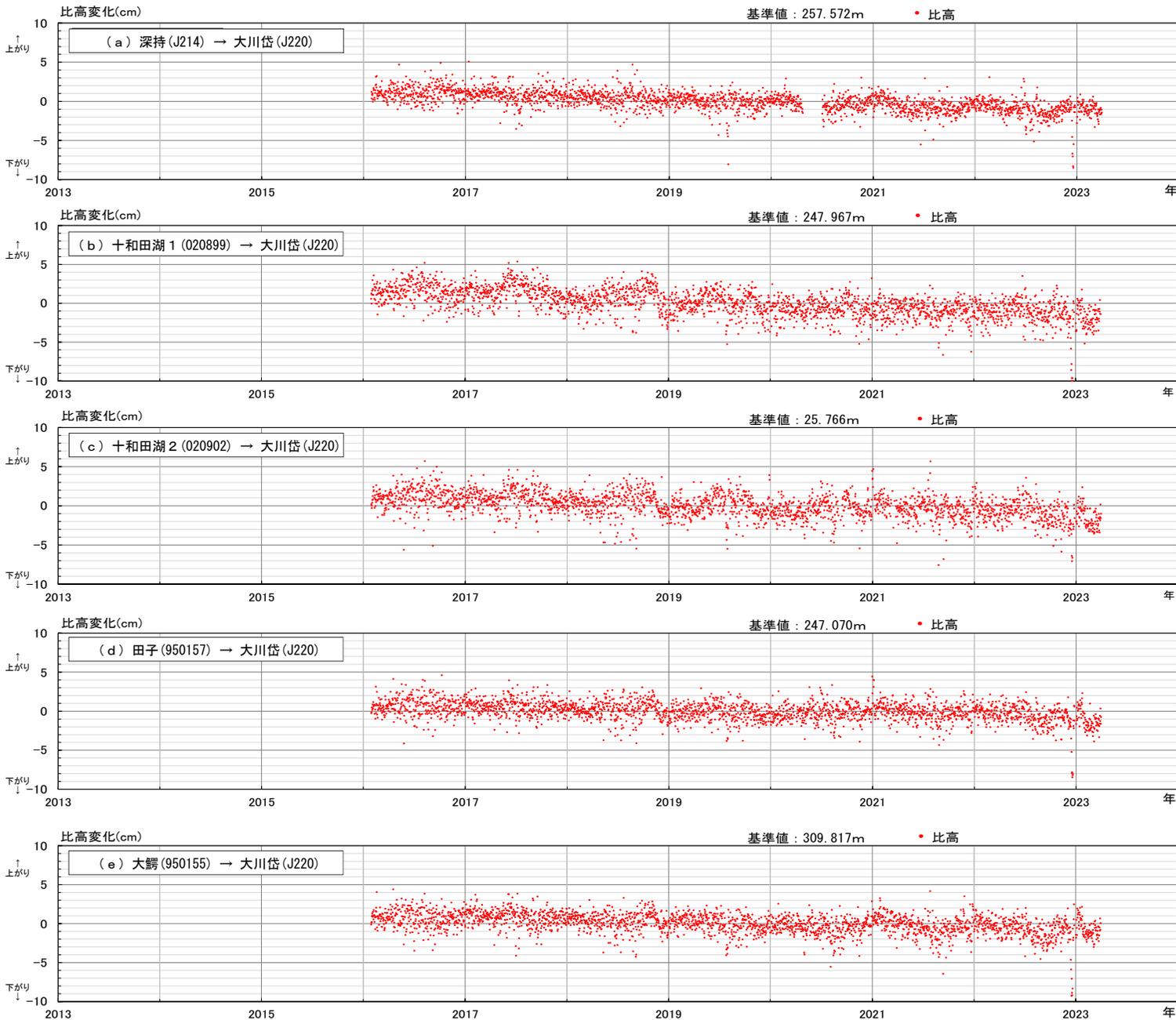


十和田を対象とした基線の追加(図中赤色の基線)  
※灰色点線は現状監視対象としている基線



八甲田山を対象とした基線の追加(図中赤線)  
※灰色点線は現状監視対象としている基線

# 6.1 気象庁観測データの導入(GNSS) 〔十和田 比高データ〕

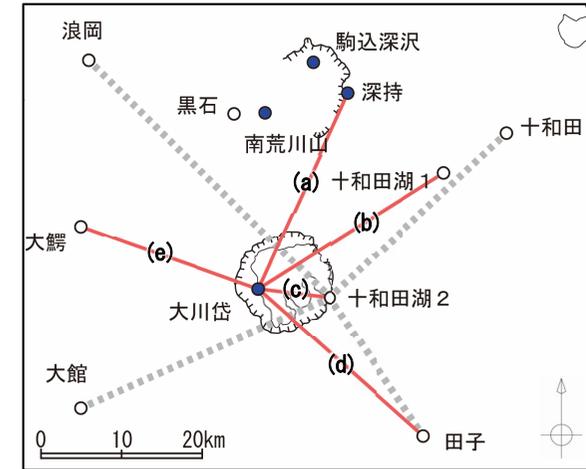
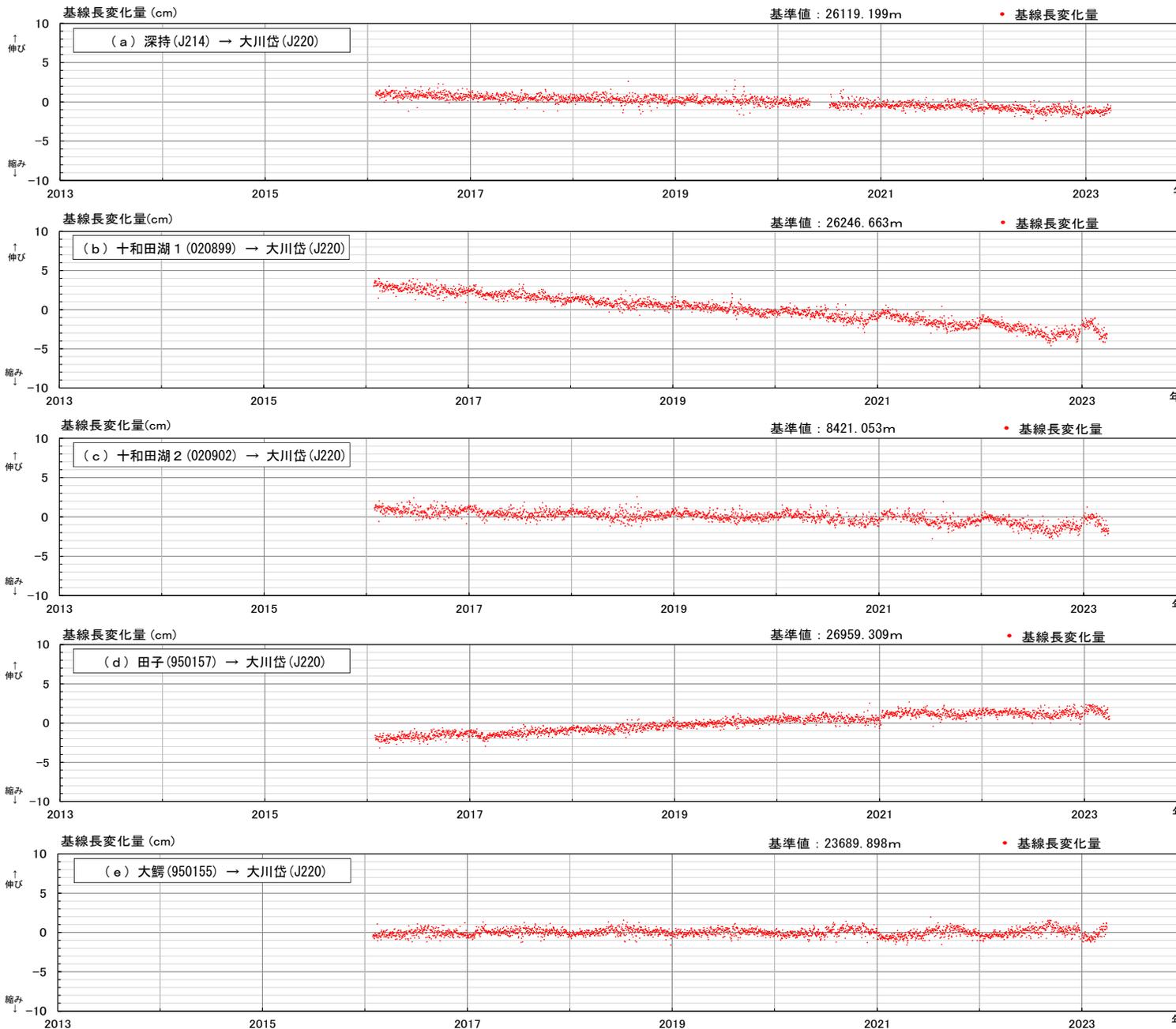


### 特記事項

観測開始以降、「大川岱」がわずかに沈下～停滞する傾向が継続する。十和田を中心とした、体系的な変位の累積及び急激な変位は認められない。

- 使用したデータおよび期間—
- 【電子基準点データ (F5解)】
    - ・国土地理院HPより取得 <https://terras.gsi.go.jp/>
    - ・用いた電子基準点: 「十和田湖 1」「十和田湖 2」「大鱧」「田子」
  - 【気象庁GNSSデータ (GNSS解析データ)】
    - ・防災科学技術研究所HP (Japan Volcanological Data Network) より取得 <https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja/>
    - ・用いた気象庁のGNSS観測点: 「大川岱」「深持」
  - 【データの期間】
    - ・2016/01/29～2023/03/31 JST

# 6.1 気象庁観測データの導入(GNSS) 〔十和田 基線長データ〕

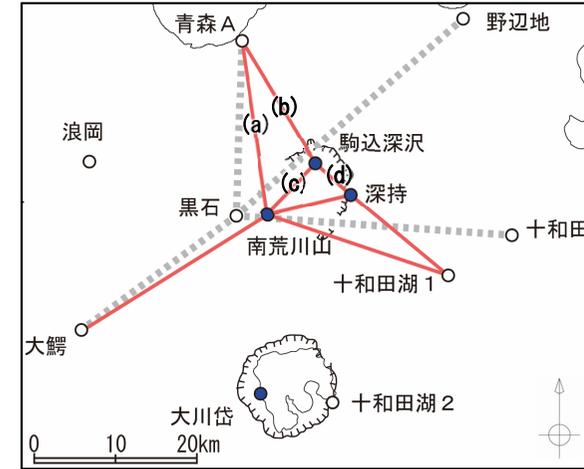
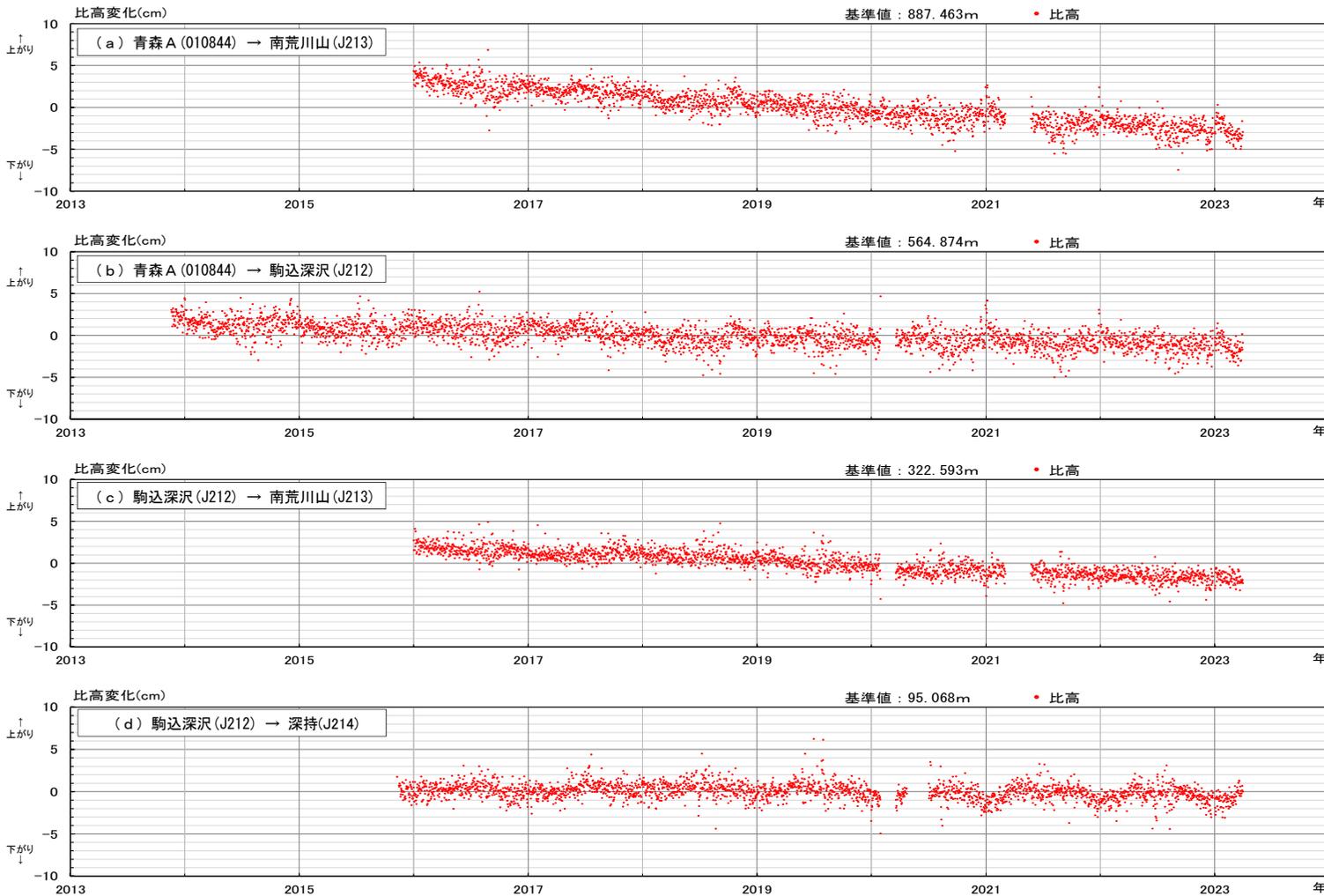


## 特記事項

観測開始以降、「大川岱」と「深持」・「十和田湖 1」・「十和田湖 2」の間は縮みの傾向、「大川岱」と「田子」との間は伸びの傾向が継続する。十和田を中心とした、系統的な変位の累積及び急激な変位は認められない。

- 使用したデータおよび期間—
- 【電子基準点データ (F5解)】
    - ・国土地理院HPより取得 <https://terras.gsi.go.jp/>
    - ・用いた電子基準点: 「十和田湖 1」「十和田湖 2」「大鰐」「田子」
  - 【気象庁GNSSデータ (GNSS解析データ)】
    - ・防災科学技術研究所HP (Japan Volcanological Data Network)より取得 <https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja/>
    - ・用いた気象庁のGNSS観測点: 「大川岱」「深持」
  - 【データの期間】
    - ・2016/01/29~2023/03/31 JST

# 6.1 気象庁観測データの導入(GNSS) 〔八甲田山 比高データ①〕



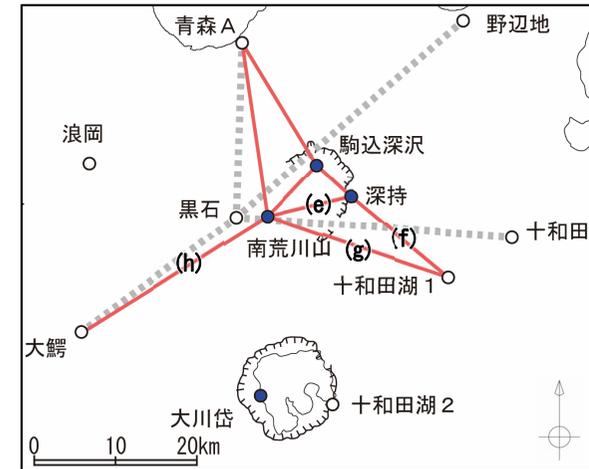
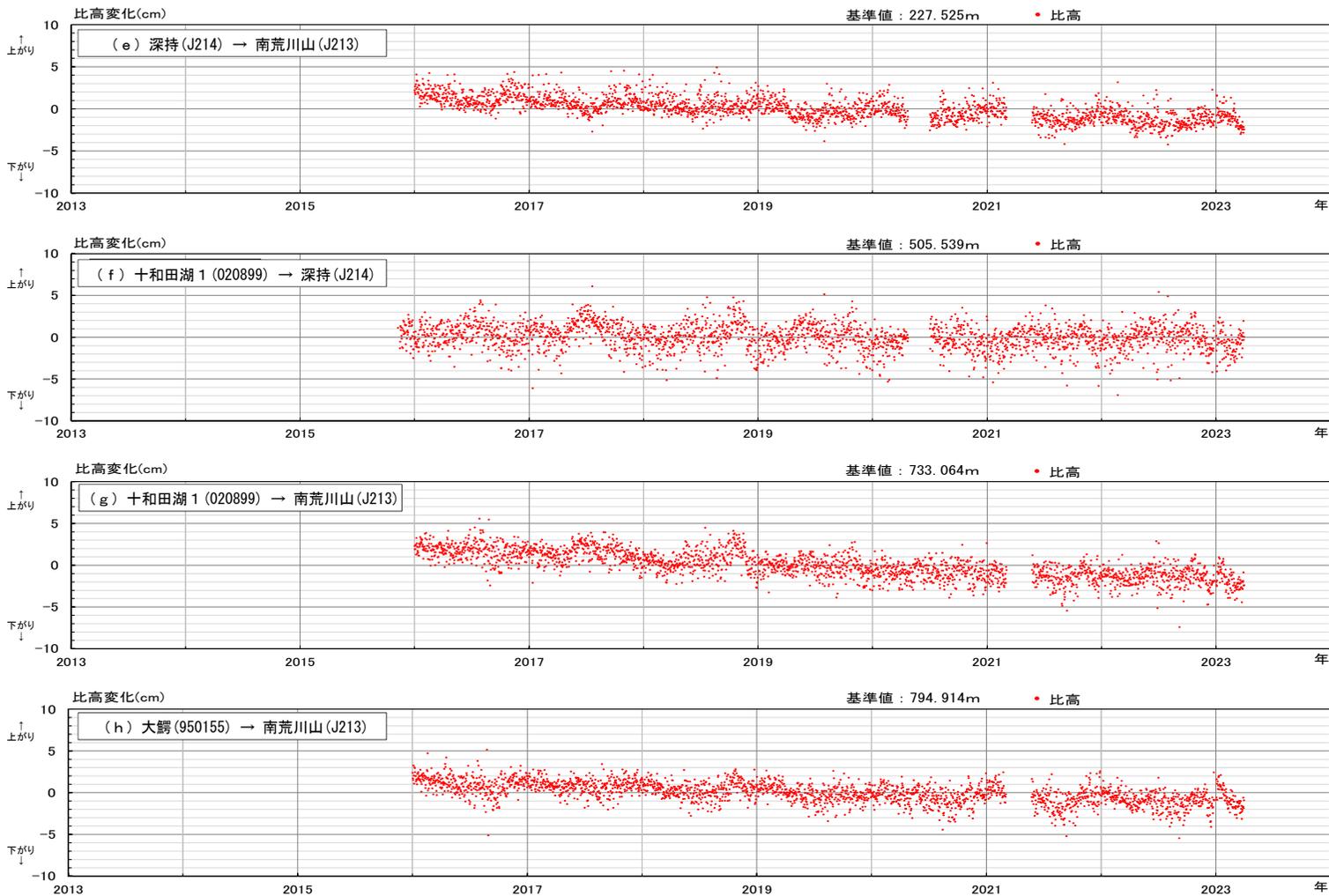
## 特記事項

観測開始以降、「南荒川山」「駒込深沢」が沈降する傾向が継続する。「駒込深沢」に対して「深持」は停滞する傾向である。八甲田山を中心とした、系統的な変位の累積及び急激な変位は認められない。

### — 使用したデータおよび期間 —

- 【電子基準点データ (F5解)】
  - ・国土地理院HPより取得 <https://terras.gsi.go.jp/>
  - ・用いた電子基準点: 「青森 A」
- 【気象庁GNSSデータ (GNSS解析データ)】
  - ・防災科学技術研究所HP (Japan Volcanological Data Network) より取得 <https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja/>
  - ・用いた気象庁のGNSS観測点: 「南荒川山」「駒込深沢」「深持」
- 【データの期間】
  - ・青森A→南荒川山, 駒込深沢→南荒川山: 2016/01/01~2023/03/31 JST
  - ・青森A→駒込深沢: 2013/11/19~2023/03/31 JST
  - ・駒込深沢→深持: 2015/11/09~2023/03/31 JST

# 6.1 気象庁観測データの導入(GNSS) 〔八甲田山 比高データ②〕



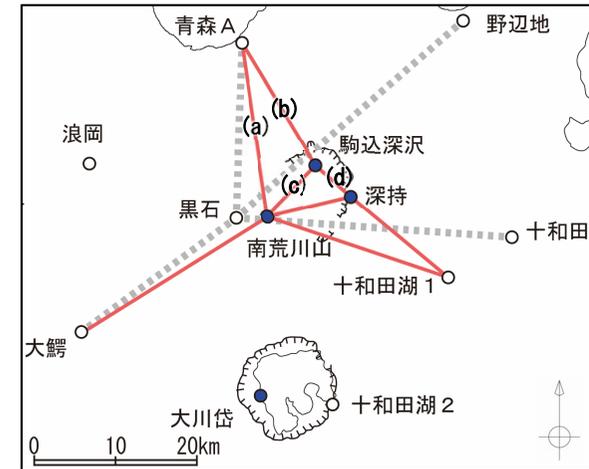
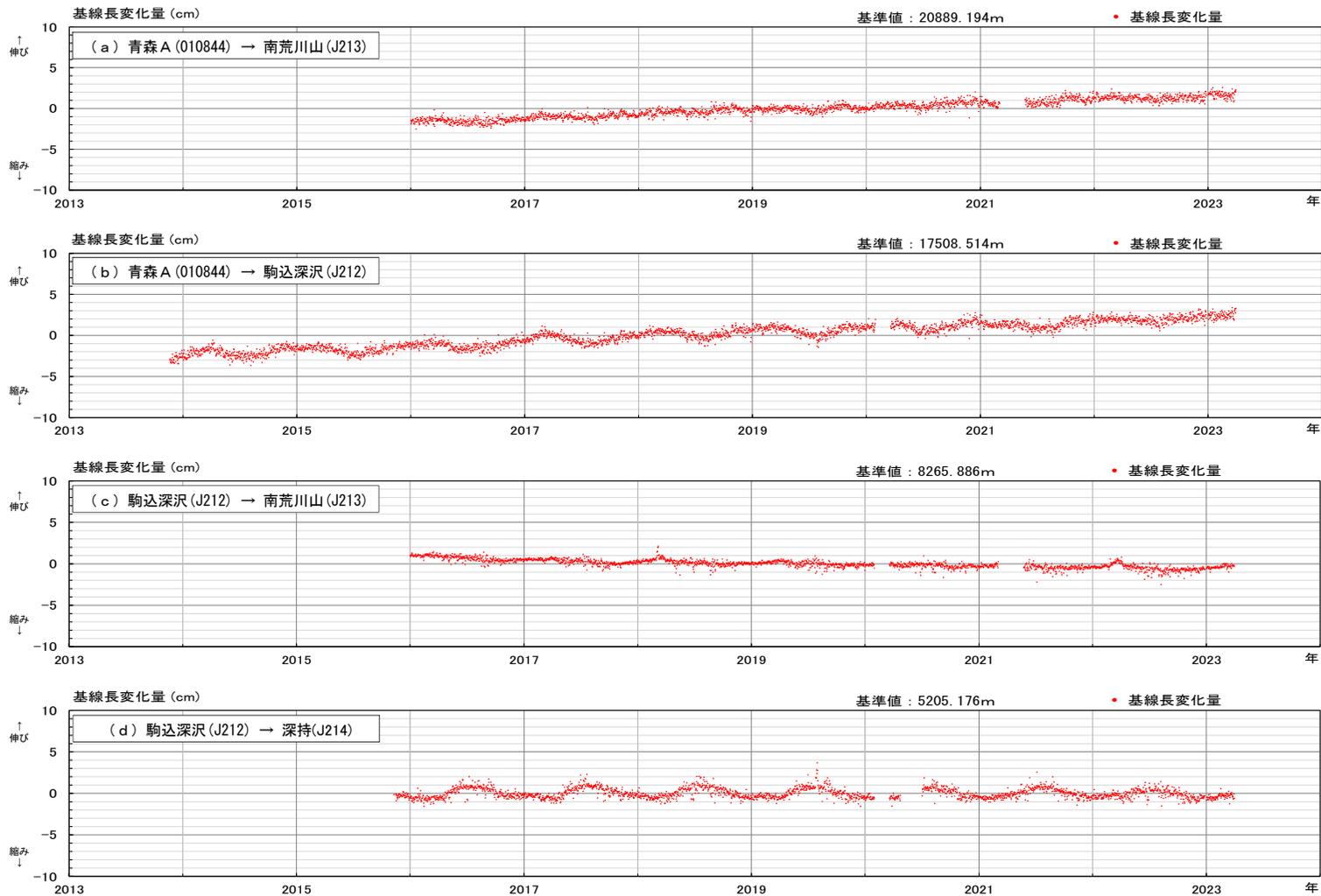
## 特記事項

観測開始以降、「南荒川山」が沈下する傾向が継続する。「十和田湖1」に対する「深持」は停滞が継続する。八甲田山を中心とした、体系的な変位の累積及び急激な変位は認められない。

### —使用したデータおよび期間—

- 【電子基準点データ (F5解)】
  - ・国土地理院HPより取得 <https://terras.gsi.go.jp/>
  - ・用いた電子基準点: 「十和田湖1」 「大罾」
- 【気象庁GNSSデータ (GNSS解析データ)】
  - ・防災科学技術研究所HP (Japan Volcanological Data Network) より取得 <https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja/>
  - ・用いた気象庁のGNSS観測点: 「南荒川山」 「深持」
- 【データの期間】
  - ・十和田湖1 → 深持: 2015/11/09 ~ 2023/03/31 JST
  - ・他の3基線: 2016/01/01 ~ 2023/03/31 JST

# 6.1 気象庁観測データの導入(GNSS) 〔八甲田山 基線長データ①〕

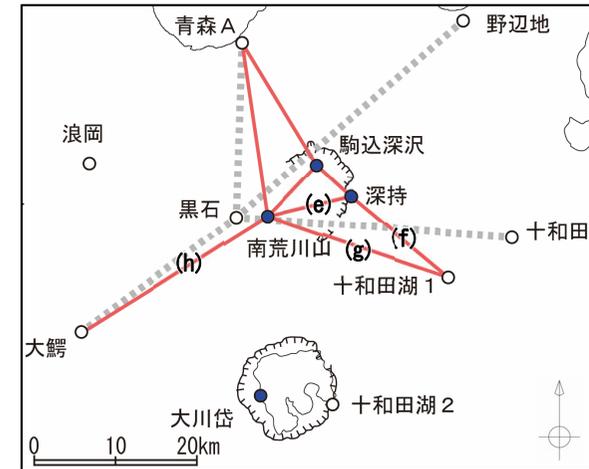
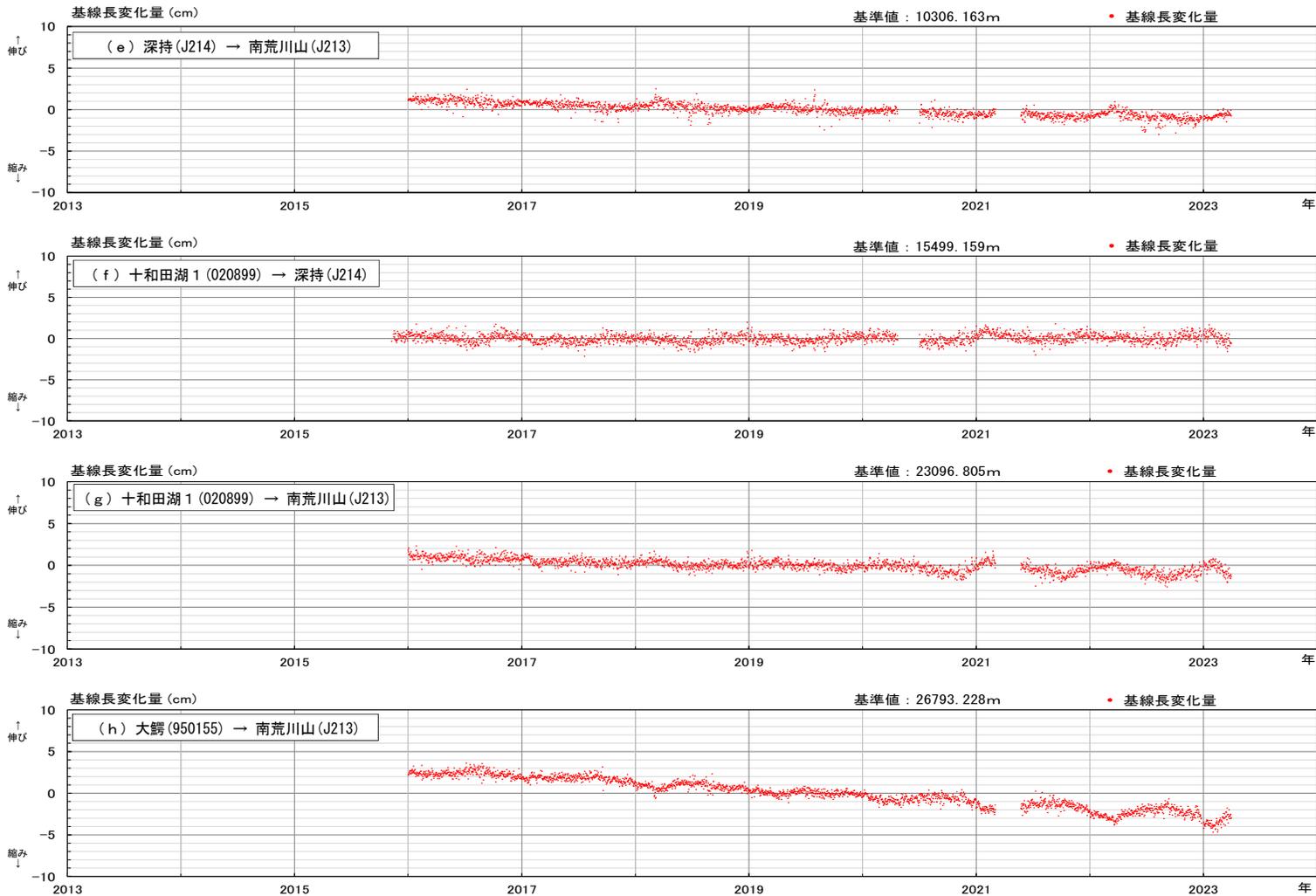


### 特記事項

観測開始以降、東西方向に縮み、南北方向に伸びの傾向が継続する。八甲田山を中心とした、体系的な変位の累積及び急激な変位は認められない。

- 使用したデータおよび期間 —
- 【電子基準点データ (F5解)】
    - ・ 国土地理院HPより取得 <https://terras.gsi.go.jp/>
    - ・ 用いた電子基準点: 「青森A」
  - 【気象庁GNSSデータ (GNSS解析データ)】
    - ・ 防災科学技術研究所HP (Japan Volcanological Data Network) より取得 <https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja/>
    - ・ 用いた気象庁のGNSS観測点: 「南荒川山」「駒込深沢」「深持」
  - 【データの期間】
    - ・ 青森A→南荒川山, 駒込深沢→南荒川山: 2016/01/01~2023/03/31 JST
    - ・ 青森A→駒込深沢: 2013/11/19~2023/03/31 JST
    - ・ 駒込深沢→深持: 2015/11/09~2023/03/31 JST

# 6.1 気象庁観測データの導入(GNSS) 〔八甲田山 基線長データ②〕



## 特記事項

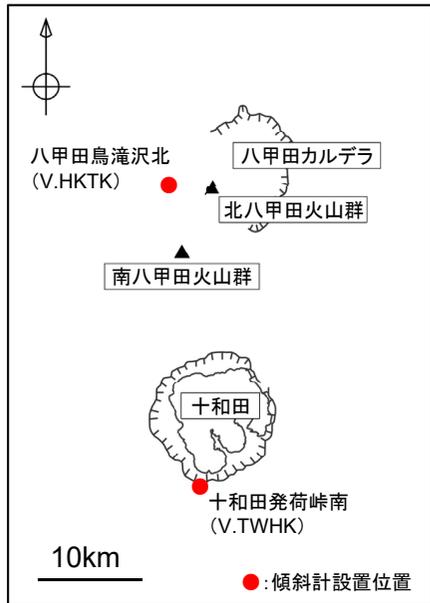
観測開始以降、東西方向に縮み、南北方向に伸びの傾向が継続する。八甲田山を中心とした、系統的な変位の累積及び急激な変位は認められない。

### — 使用したデータおよび期間 —

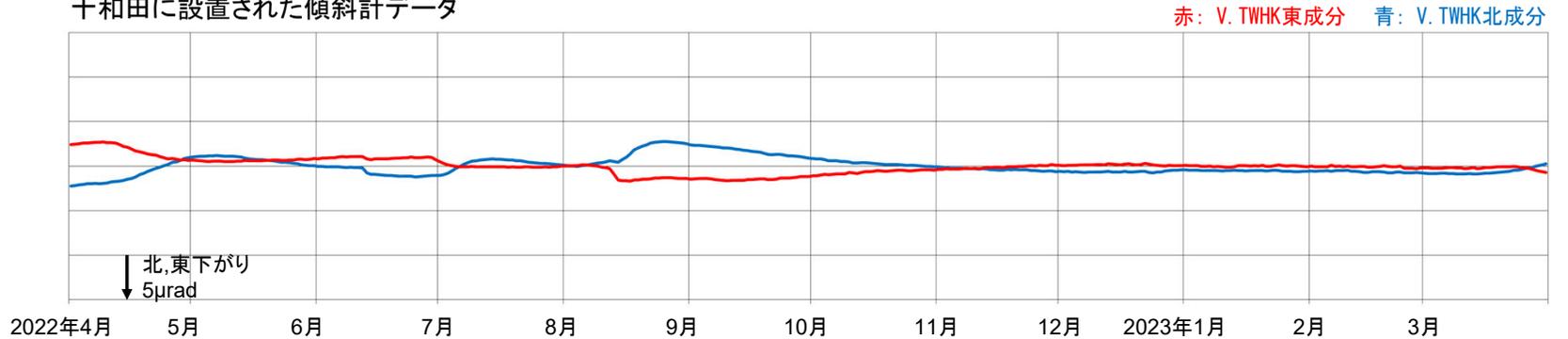
- 【電子基準点データ (F5解)】
  - ・国土地理院HPより取得 <https://terras.gsi.go.jp/>
  - ・用いた電子基準点: 「十和田湖1」「大鱈」
- 【気象庁GNSSデータ (GNSS解析データ)】
  - ・防災科学技術研究所HP (Japan Volcanological Data Network) より取得 <https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja/>
  - ・用いた気象庁のGNSS観測点: 「南荒川山」「深持」
- 【データの期間】
  - ・十和田湖1 → 深持: 2015/11/09 ~ 2023/03/31 JST
  - ・他の3基線: 2016/01/01 ~ 2023/03/31 JST

# 6.1 気象庁観測データの導入(傾斜計) [傾斜計データ]

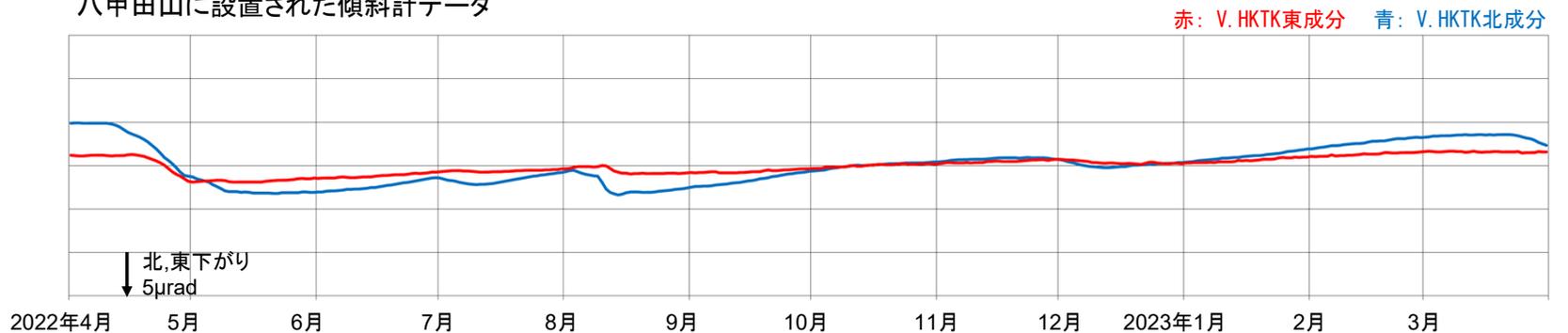
- 防災科学技術研究所によるJapan Volcanological Data Network(JVDN)より、気象庁が設置した傾斜計の観測データをダウンロード・整理した。
- 火山活動によると考えられる顕著な傾斜変動は認められなかった。
- なお、気象庁の火山活動解説資料等では、十和田及び八甲田山の傾斜計観測データ変化については特段の報告はなされていない。



十和田に設置された傾斜計データ



八甲田山に設置された傾斜計データ



— 使用した気象庁傾斜計データ —

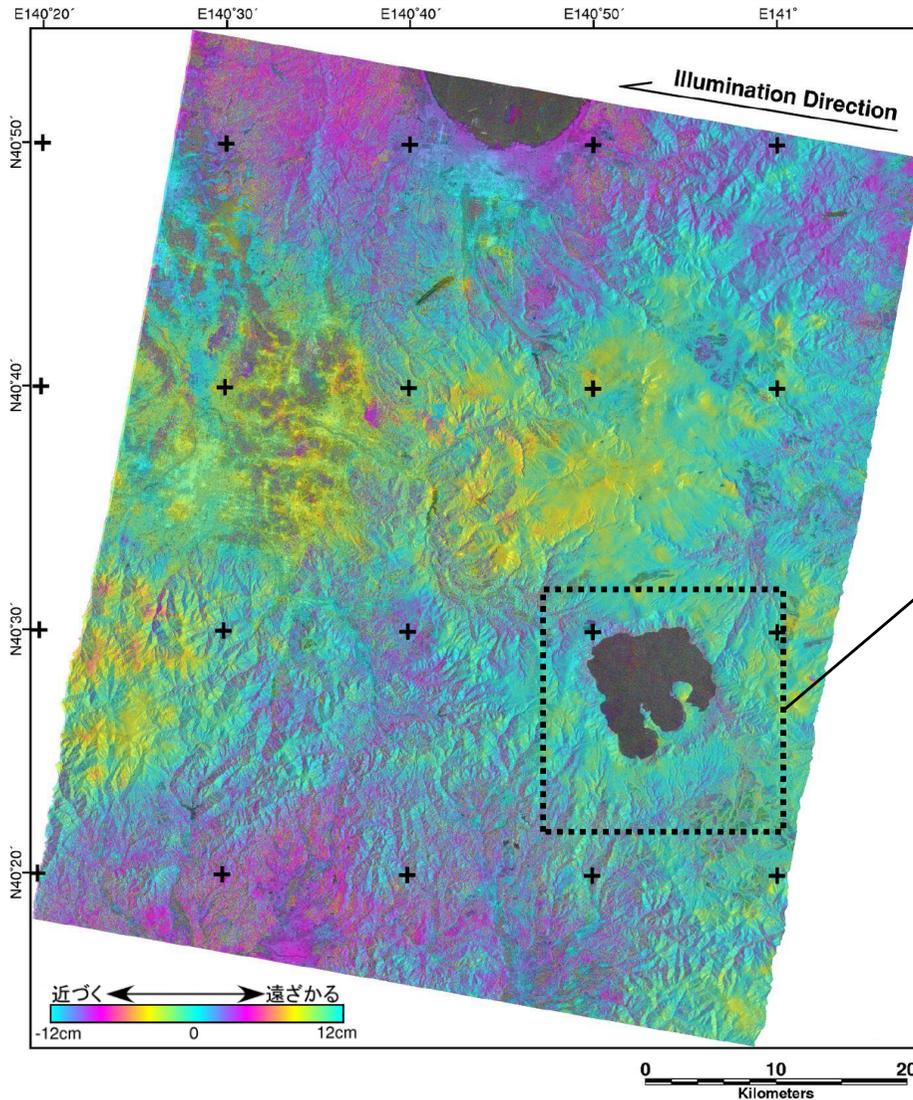
- ・ 防災科学技術研究所HP (Japan Volcanological Data Network) より取得 <https://jvdm.bosai.go.jp/portal/ja/>
- ・ 用いた気象庁の観測点: 十和田発荷峠南 (V. TWHK), 八甲田鳥滝沢北 (V. HKTK) ※いずれも潮汐補正済み
- ・ データの期間: 2022/04/01~2023/03/31 JST

## 6.2 干渉SAR解析〔十和田 2021年～2022年〕

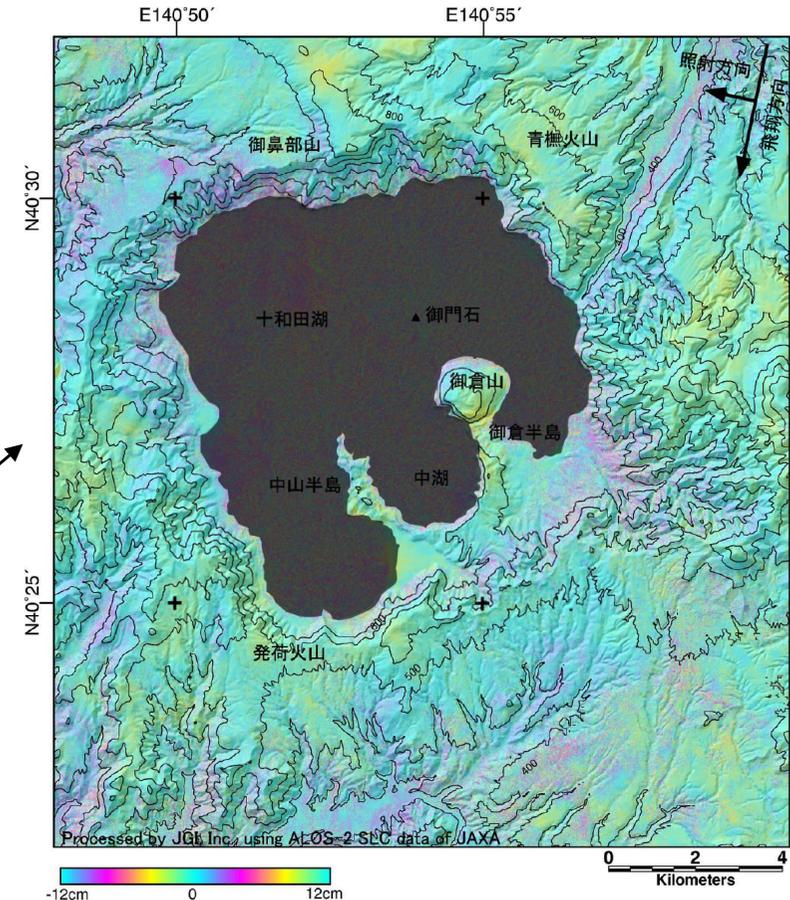
解析に用いたデータ

- ・陸域観測技術衛星だいち2号(ALOS-2):Lバンド合成開口レーダのPALSAR-2データ
- 観測日:2021年9月2日, 2022年9月1日

- ・観測モード:SM1(3m/pix)
- ・オフナディア角:35.4
- ・進行方向:南降軌道, 照射方向:右視



差分位相図



### 特記事項

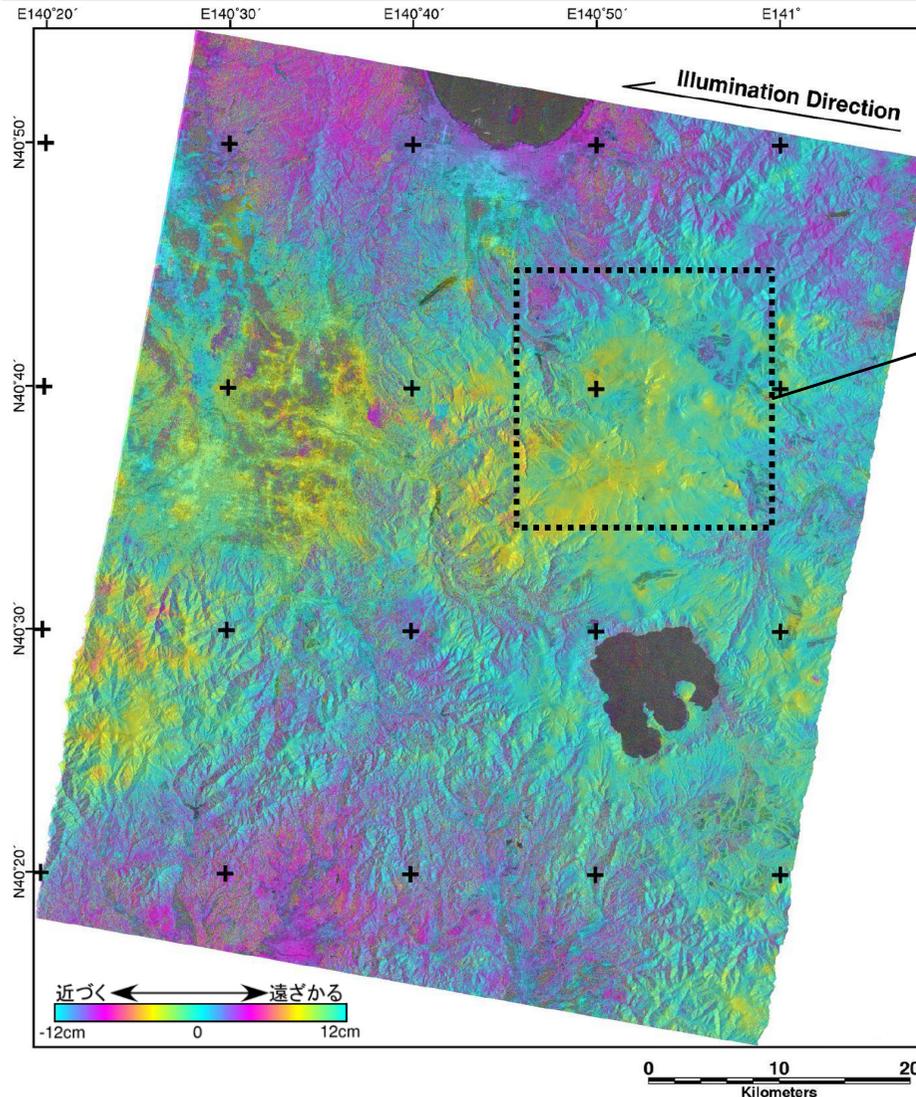
干渉性が良好に保たれる短期(約1年間)のペアとして2021年9月2日と2022年9月1日の観測データを選定し干渉SAR解析を行った。その結果, 水蒸気遅延成分が認められるものの, 十和田を中心とした顕著な変動は認められない。

## 6.2 干渉SAR解析〔八甲田山 2021年～2022年〕

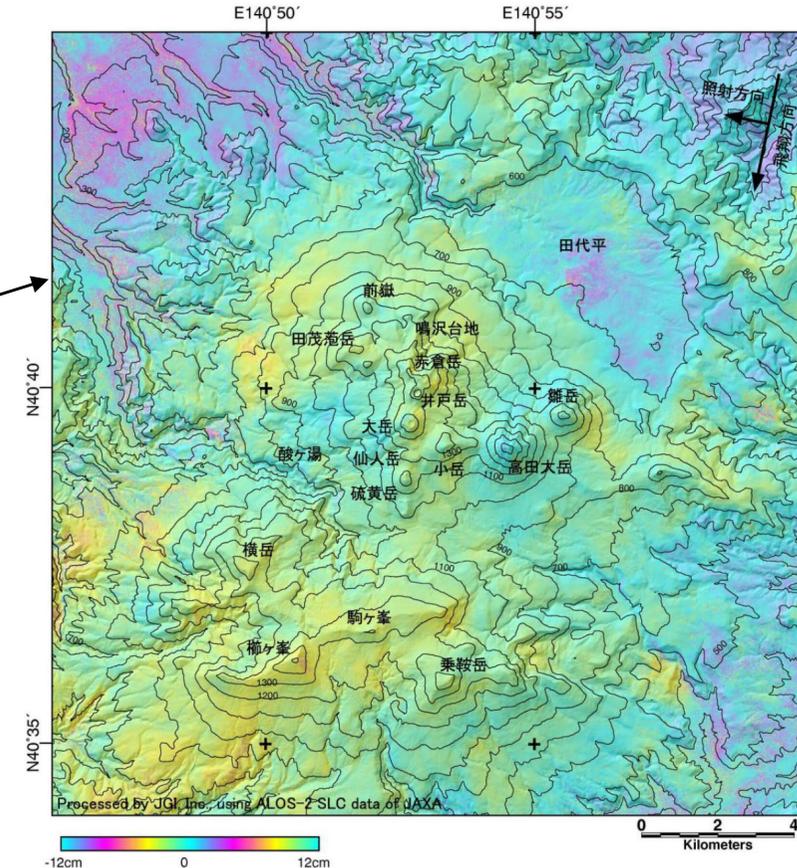
解析に用いたデータ

- ・陸域観測技術衛星だいち2号(ALOS-2):Lバンド合成開口レーダのPALSAR-2データ
- 観測日:2021年9月2日, 2022年9月1日

- ・観測モード:SM1(3m/pix)
- ・オフナディア角:35.4
- ・進行方向:南降軌道, 照射方向:右視



差分位相図



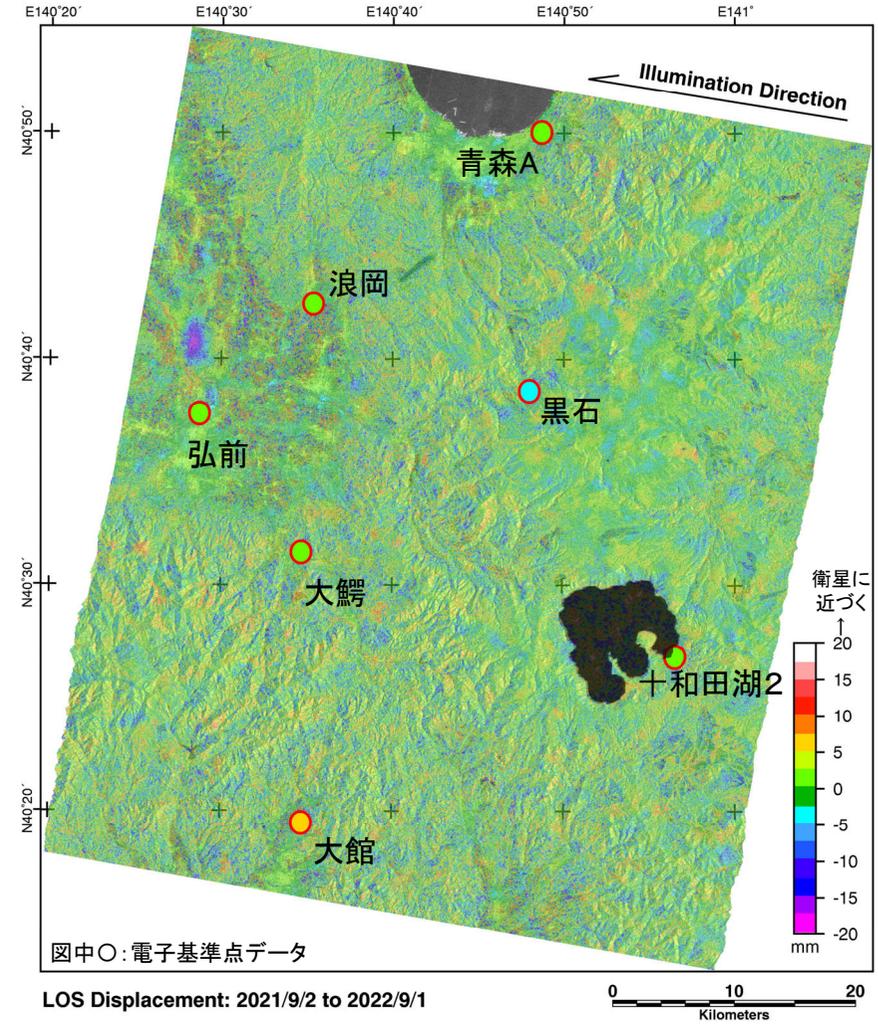
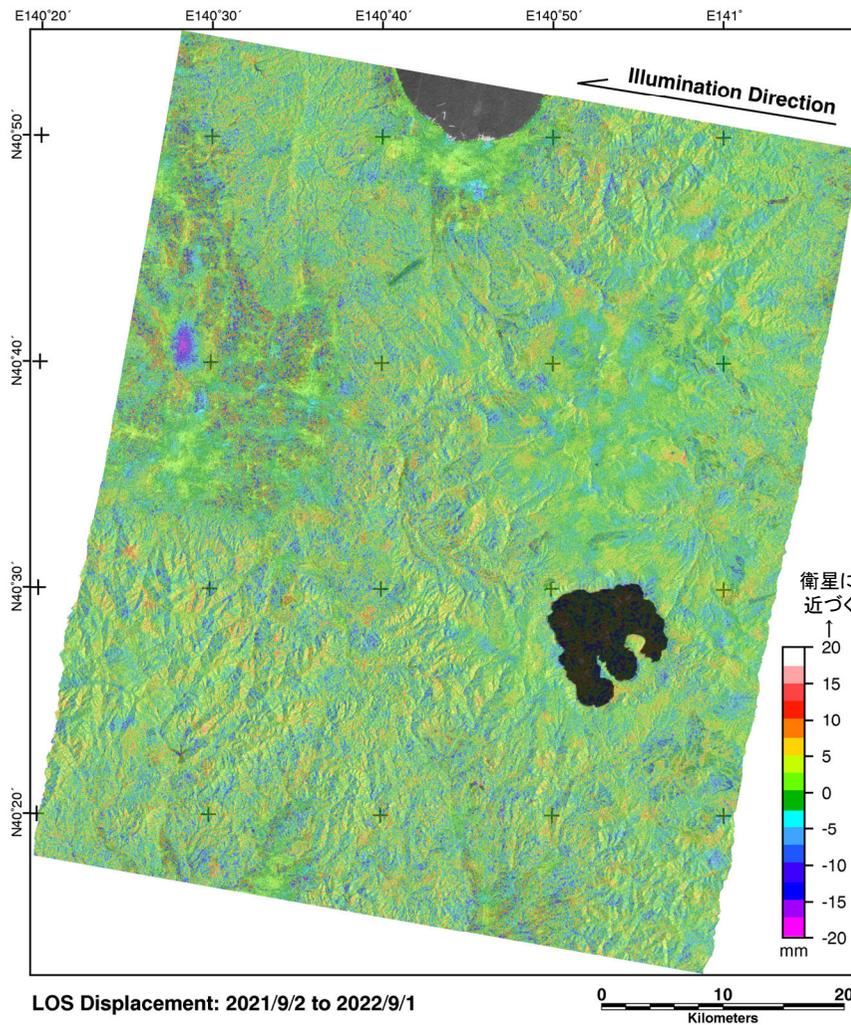
### 特記事項

干渉性が良好に保たれる短期(約1年間)のペアとして2021年9月2日と2022年9月1日の観測データを選定し干渉SAR解析を行った。その結果、水蒸気遅延成分が認められるものの、八甲田山を中心とした顕著な変動は認められない。

## 6.2 干渉SAR解析

### 〔干渉SARデータと電子基準点データの整合性に関する検討:2021年9月~2022年9月〕

- 2021年9月2日-2022年9月1日ペアの差分干渉SAR解析結果と、同期間における電子基準点データ処理結果を比較したところ、SARのノイズレベルの範囲内で概ね整合する結果となった。



#### 差分干渉SAR解析結果と電子基準点データ処理結果の比較

SAR解析結果は水蒸気遅延の低減処置を施した変位量図

右図中○: 電子基準点データ(2021年9月2日~2022年9月1日期间)から得られた、青森Aに対する変位量(LOS方向に変換)

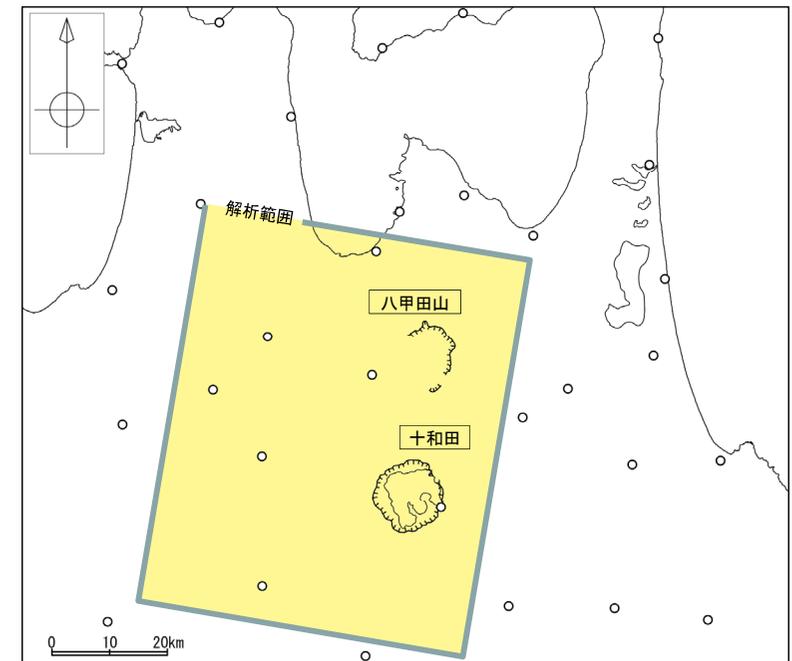
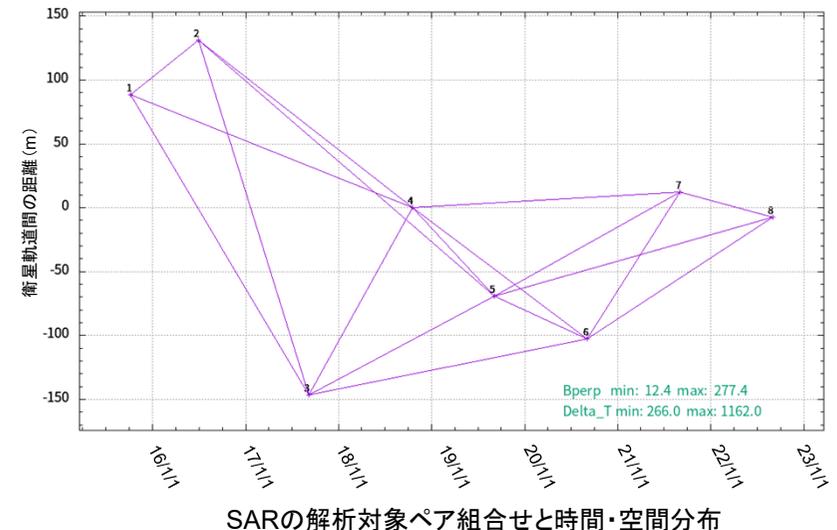
## 6.2 干渉SAR解析

### 〔干渉SARデータと電子基準点データの整合性に関する検討:時系列解析〕

- SBAS法による干渉SAR時系列解析を実施し、電子基準点データと比較を行った。
- 解析対象である十和田・八甲田山は広く植生が発達していることから、干渉SAR時系列解析には、LバンドSARデータ(ALOS-2/PALSAR-2データ)を用いた。

#### 解析の条件と内容・データ諸元

干渉SAR時系列解析法	SBAS法 (衛星軌道間の距離(垂直基線長)が短く、2データの取得日間隔が短いSARデータで多数の差分干渉処理を行い、各観測時の変動量を推定する手法)
使用したSAR衛星	ALOS-2/PALSAR-2(Lバンド)
軌道・照射方向	南降軌道・右視
使用したシーン	2015/10/8 2016/6/30 2017/9/7 2018/10/18 2019/9/5 2020/9/3 2021/9/2 2022/9/1
SARの解析範囲に含まれる電子基準点	青森A:010844(固定), 浪岡:960538, 黒石:960541, 弘前:960540, 大鰐:950155, 十和田湖2:020902, 大館:950181
SARの処理内容	位置合わせ, 基線長調整, 差分干渉処理, 比高差を考慮した水蒸気遅延成分の低減, スタッキング処理による位相ノイズ低減, SBAS法
電子基準点データの処理内容	F5解を用いて青森Aに対する各点の変位量を算出。なお、F5解はSARデータ観測日の前後7日の平均を採用。これと衛星視線(LOS)方向の単位ベクトルとの内積を取ることで、LOS変位量に変換。

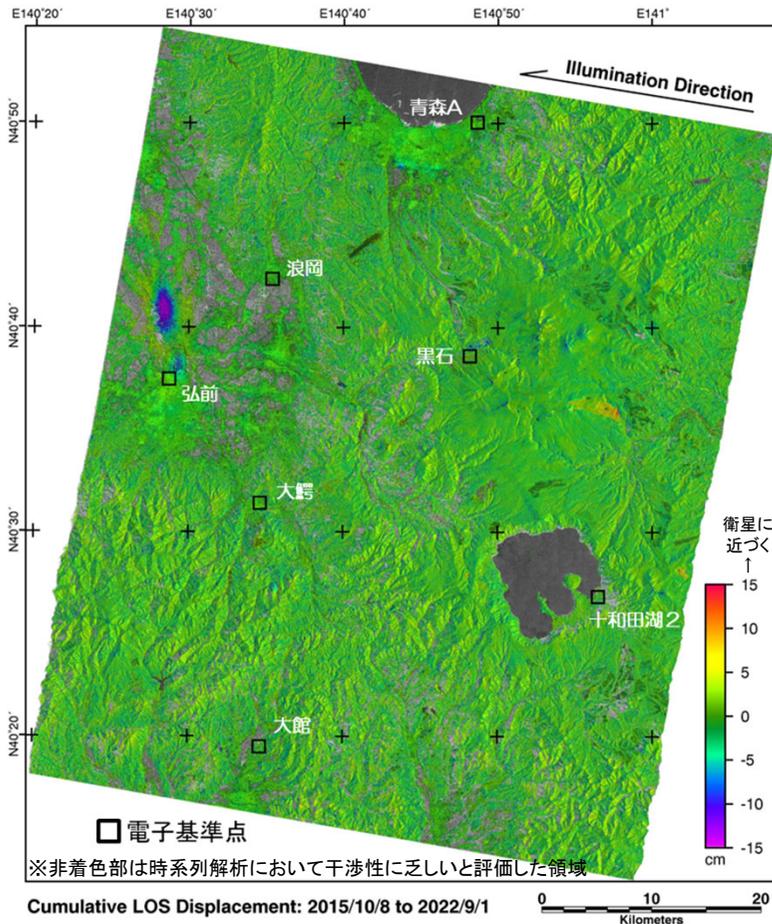


解析対象範囲  
黄色の範囲: 干渉SARの解析範囲  
図中○: 電子基準点の位置

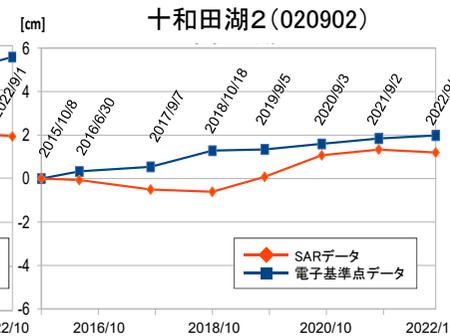
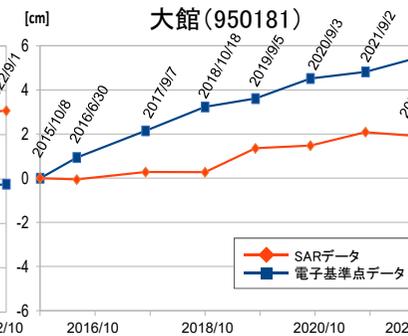
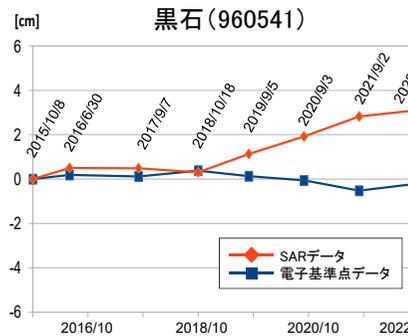
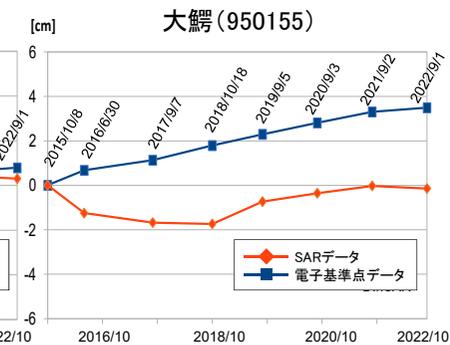
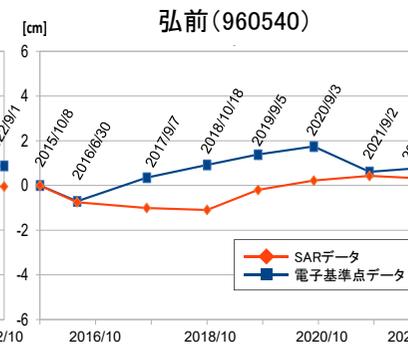
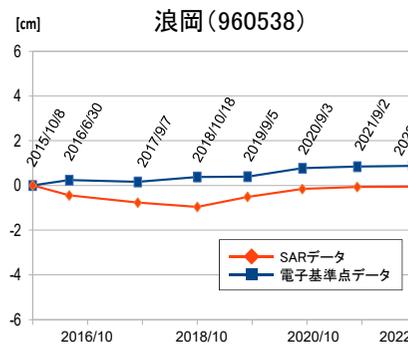
## 6.2 干渉SAR解析

### 〔干渉SARデータと電子基準点データの整合性に関する検討:時系列解析〕

- 干渉SAR時系列解析の結果では、弘前市周辺や八甲田山東麓の蔦温泉周辺、十和田東方等における変位が検知される。
- 干渉SAR時系列解析の結果と電子基準点データ処理結果を比較すると、十和田近傍の「十和田湖2」や「浪岡」、「弘前」では概ね両データの傾向は整合的であるが、八甲田山近傍の「黒石」や「大鰐」「大館」では乖離が見られる。また、「黒石」を除き、SARデータは電子基準点データを下回る。両データ間に乖離が生じている要因として、地形・地表面の形状に起因して当該箇所のコヒーレンスが低下していることで、位相ノイズが相対的に増大している可能性が考えられる。
- 現状では干渉SAR解析による地殻変動観測には精度の面で課題があるため、引き続き高精度な干渉SAR解析手法を検討する。

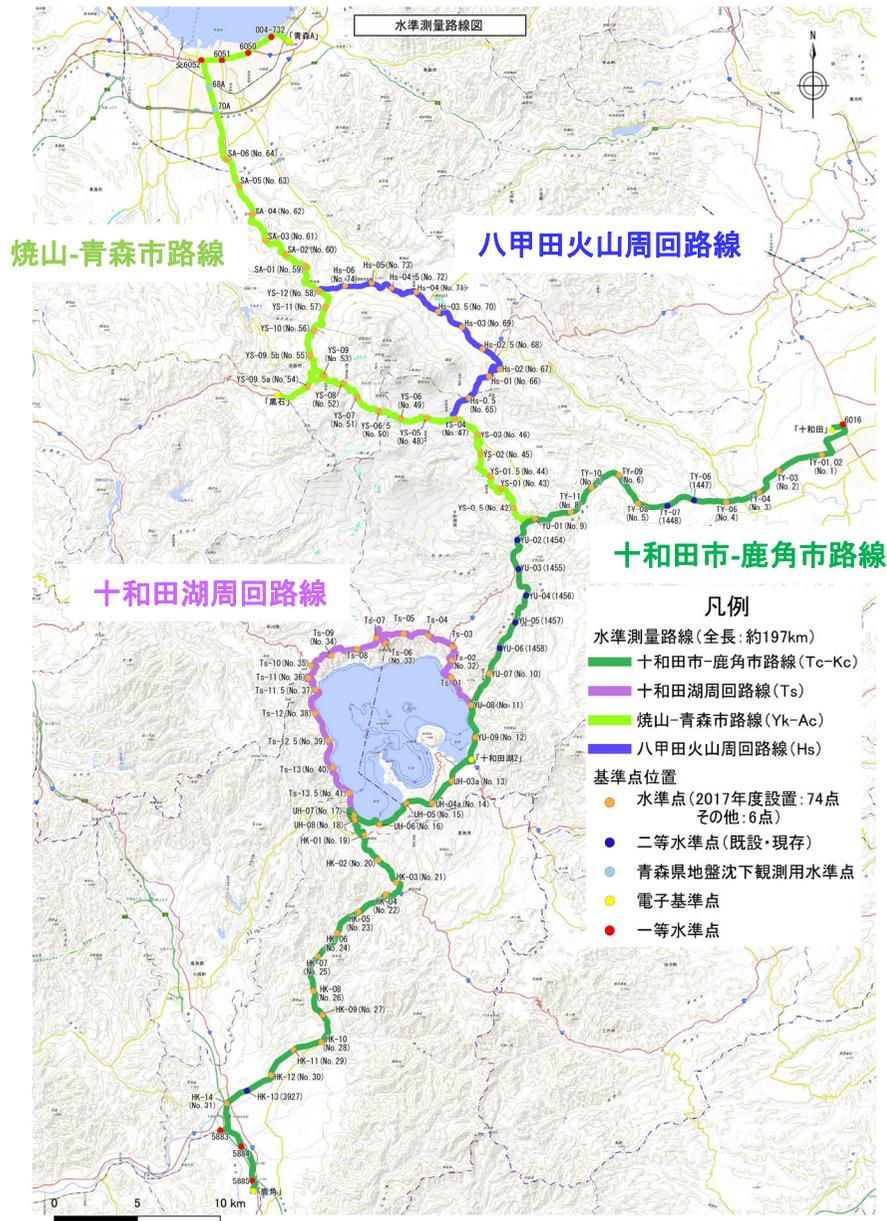


干渉SAR時系列解析結果:LOS方向の変位量  
(2015/10/8~2022/9/1期間の累積変位量)



干渉SAR時系列解析結果と電子基準点データ処理結果の比較  
(2015/10/8~2022/9/1期間の時系列変化)

## 6.3 水準測量〔水準点の設置と水準測量の実施計画〕



2017年度に十和田, 八甲田山周辺に水準点を新設  
→既存の一等水準点, 二等水準点(電子基準点含む)等と  
新設水準点(74点)を用いて路線を設定し, 今後水準測量  
を実施予定(合計103点, 全路線長約197km)

### 【十和田における地殻変動の把握】

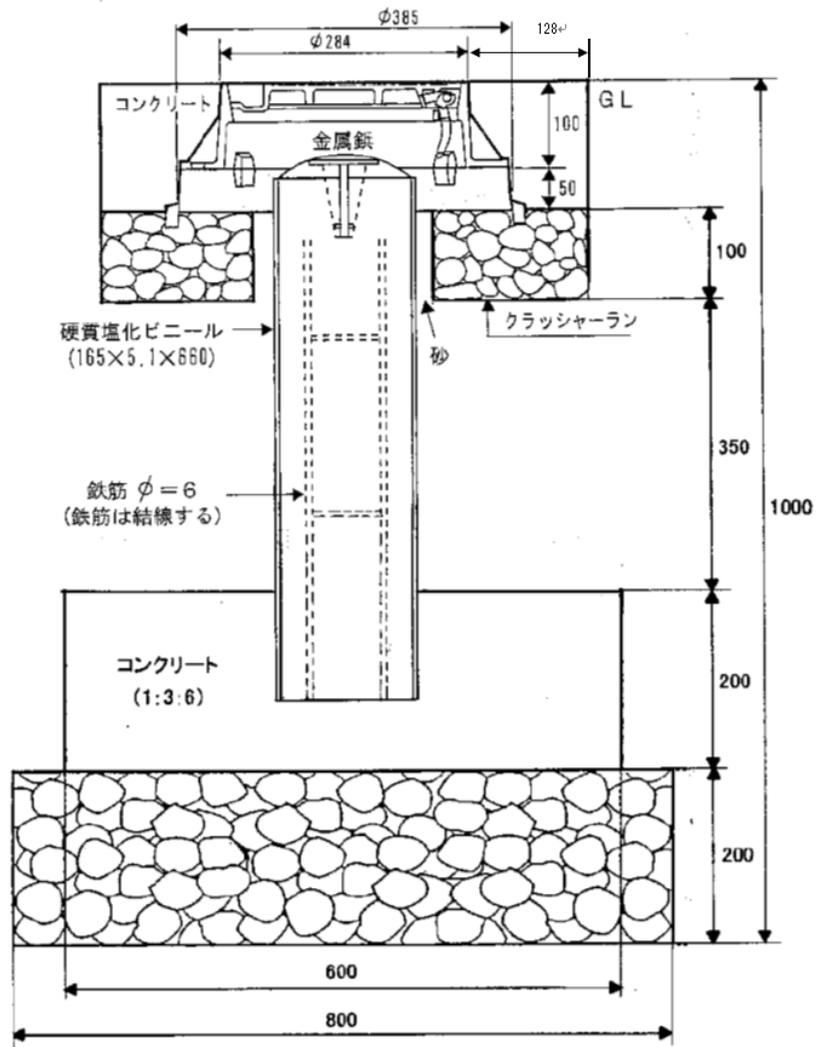
- ・十和田市(電子基準点「十和田」)から奥入瀬溪流, 電子基準点「十和田湖2」, 発荷峠を通り鹿角市内(電子基準点「鹿角」)へ繋がる路線(十和田市-鹿角市路線)
- ・十和田のカルデラ縁を一周する路線(十和田湖周回路線)

### 【八甲田山における地殻変動の把握】

- ・焼山(十和田市-鹿角市路線と接続)から電子基準点「黒石」, 酸ヶ湯を通り青森市内(電子基準点「青森A」)へ繋がる路線(焼山-青森市路線)
- ・八甲田カルデラを横断して北八甲田火山群を取り囲む路線(八甲田火山周回路線)

2018年度, 2019年度, 2022年度に水準測量を実施し, 路線全体で期間内の変動量を算出。今後も3年に1回実施予定。

## 6.3 水準測量 [設置した水準点の仕様]



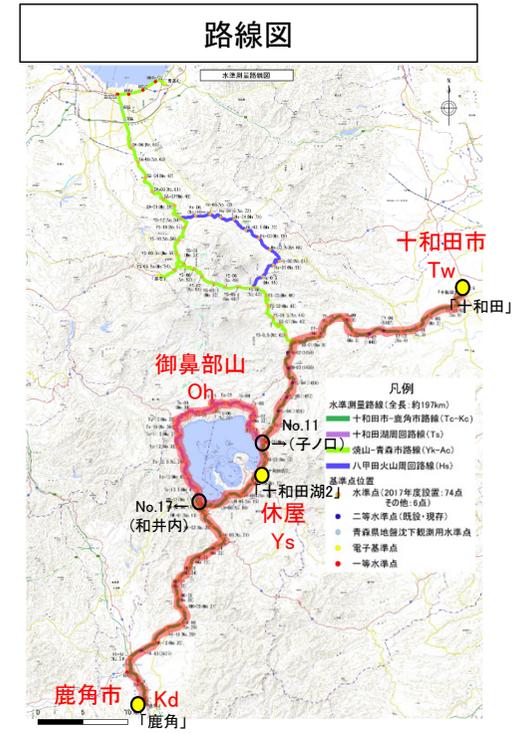
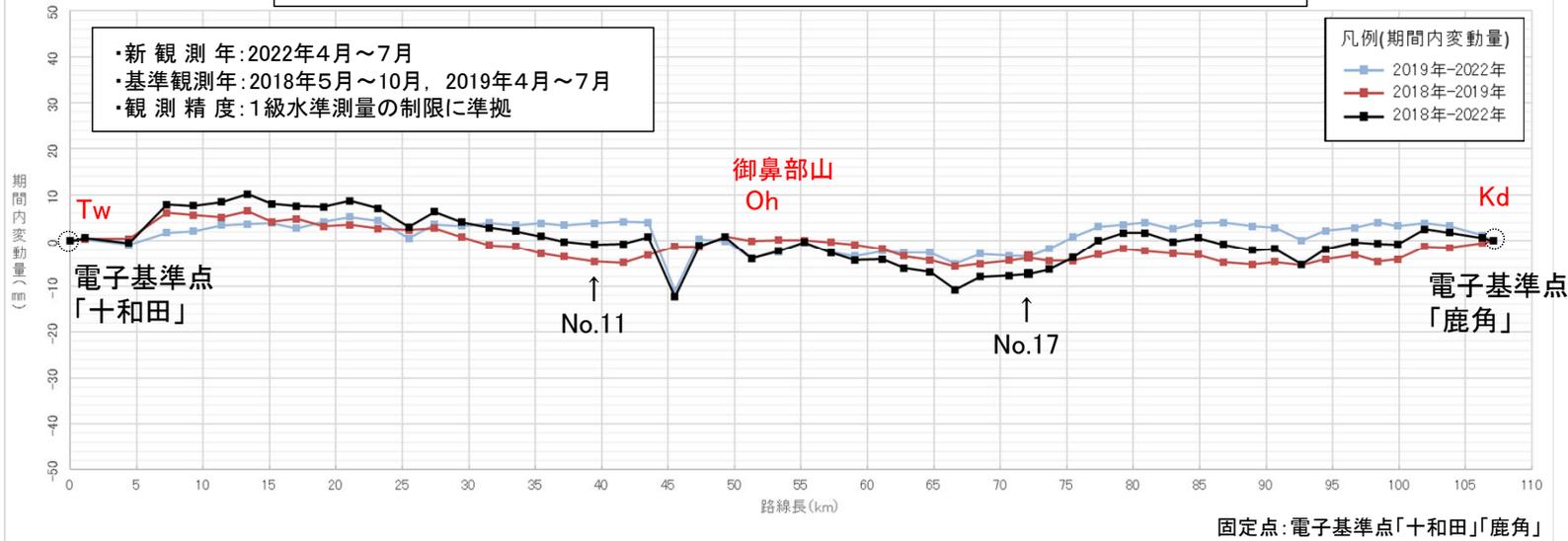
設置した水準点の構造



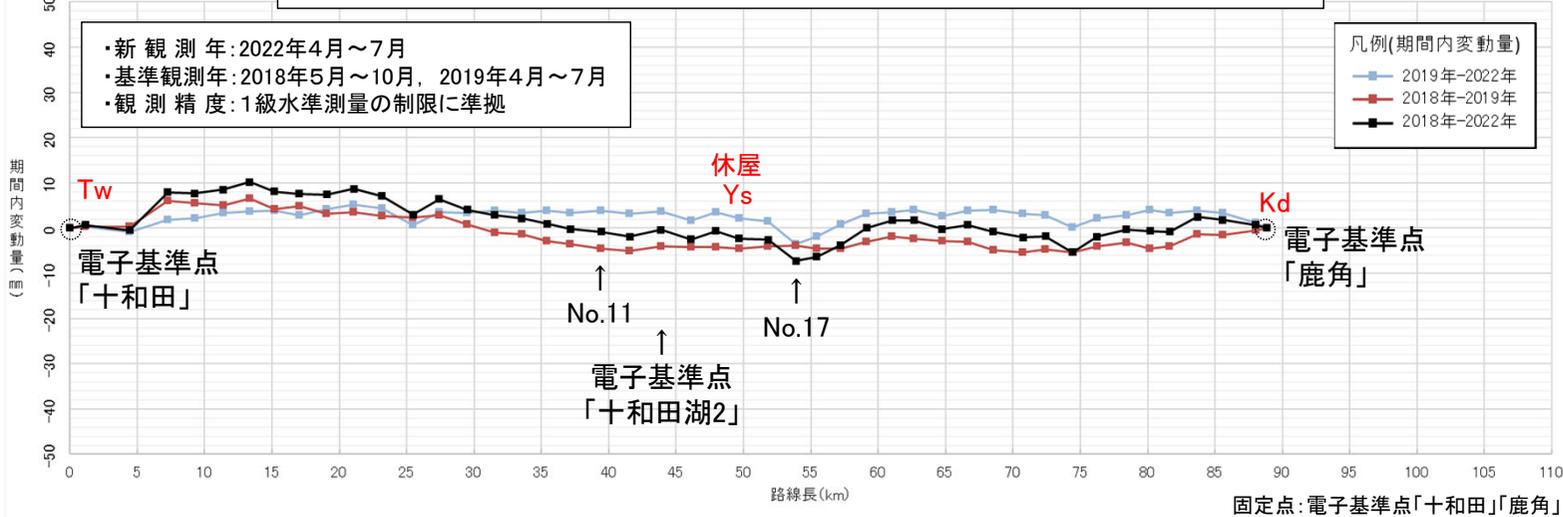
設置状況例

# 6.3 水準測量〔十和田 2018年～2022年〕

十和田市(Tw)から御鼻部山(Oh)を経由し鹿角市(Kd)へ至る路線  
(期間内変動量)



十和田市(Tw)から休屋(Ys)を経由し鹿角市(Kd)へ至る路線  
(期間内変動量)

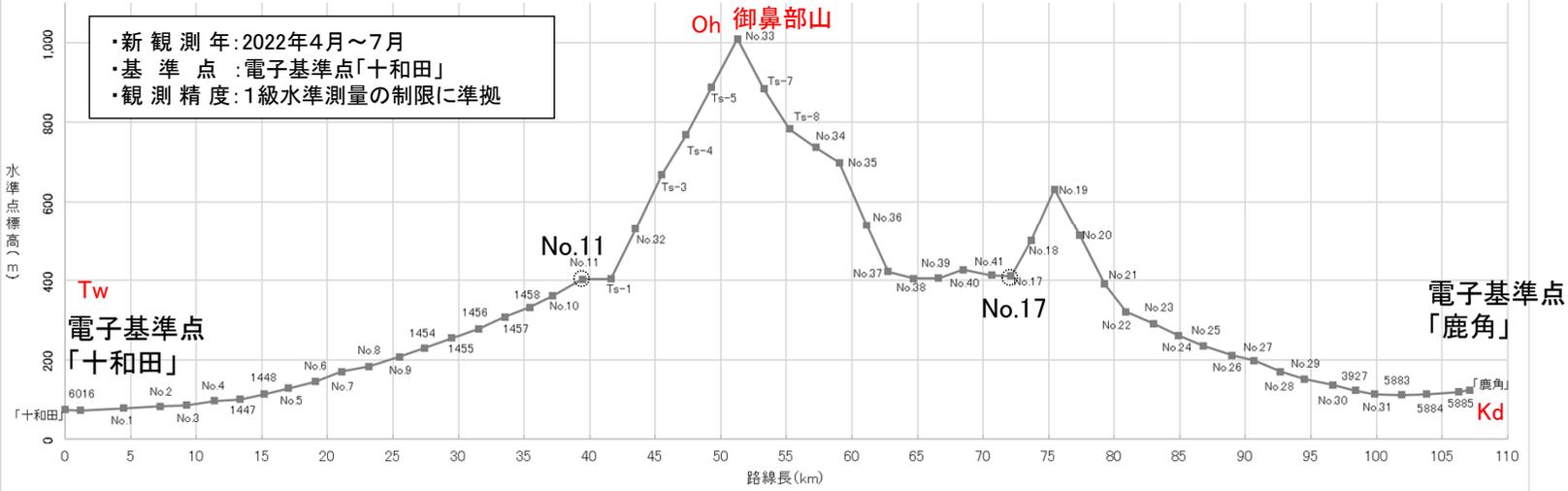


特記事項

十和田周辺において局所的に沈降する傾向が認められるが、十和田を中心とした、顕著な地殻変動の傾向は認められない。

# 6.3 水準測量〔十和田（地形断面図）〕

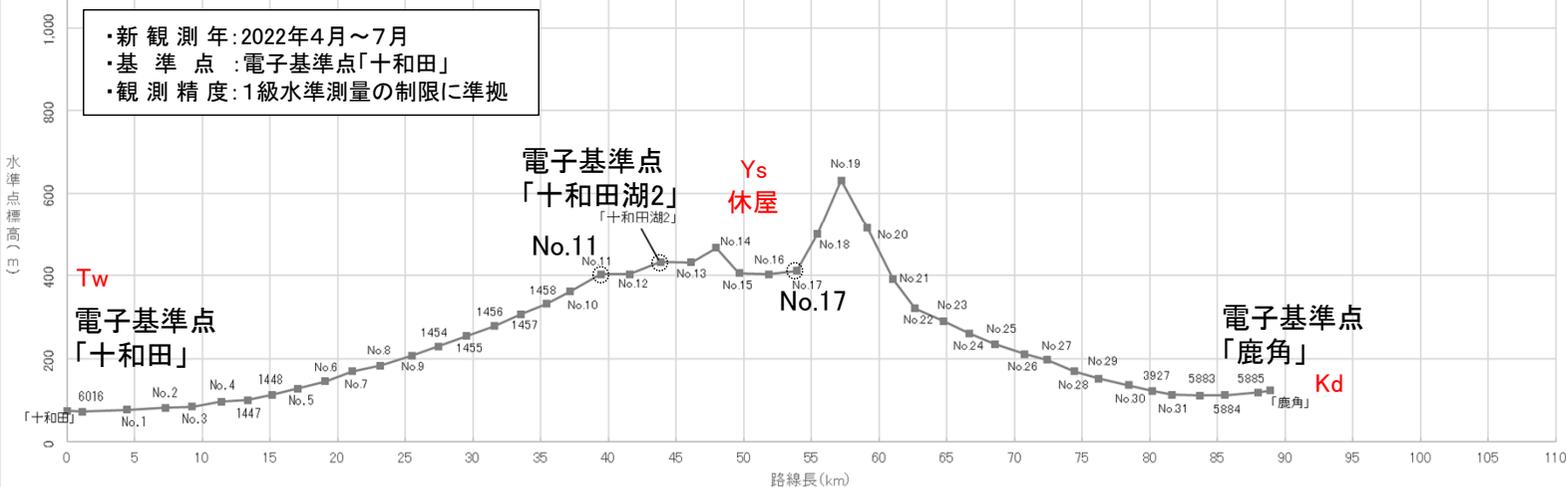
十和田市(Tw)から御鼻部山(Oh)を經由し鹿角市(Kd)へ至る路線  
(地形断面図)



路線図

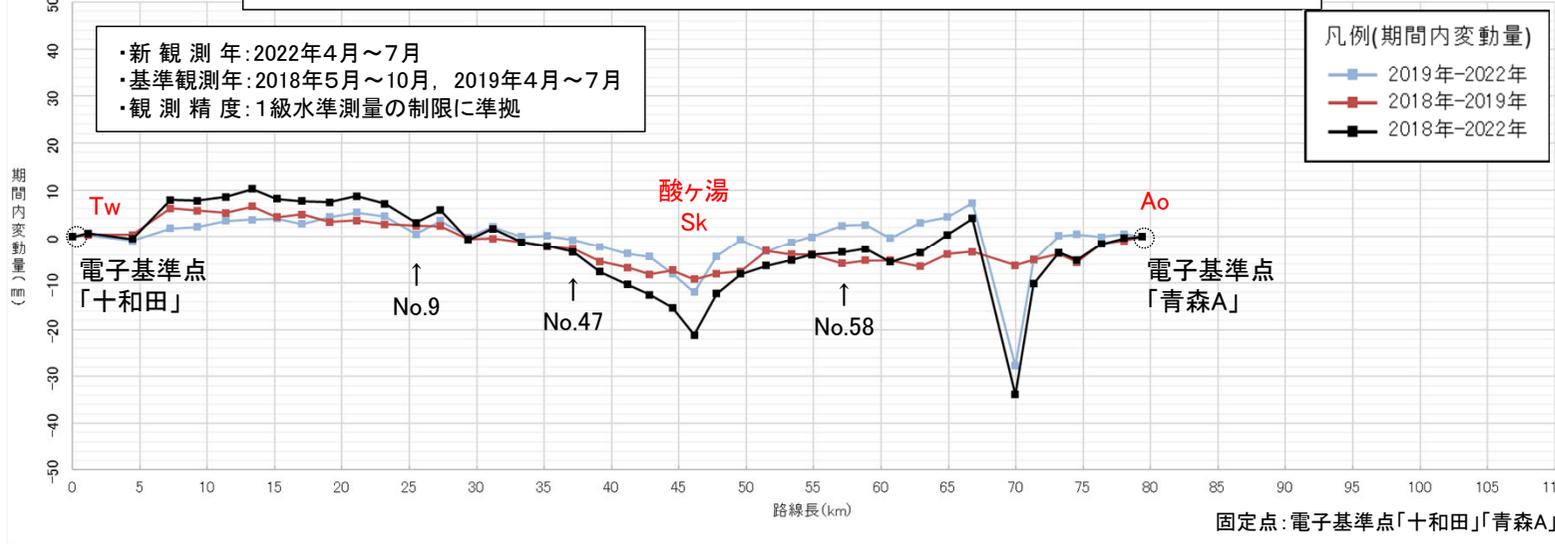


十和田市(Tw)から休屋(Ys)を經由し鹿角市(Kd)へ至る路線  
(地形断面図)

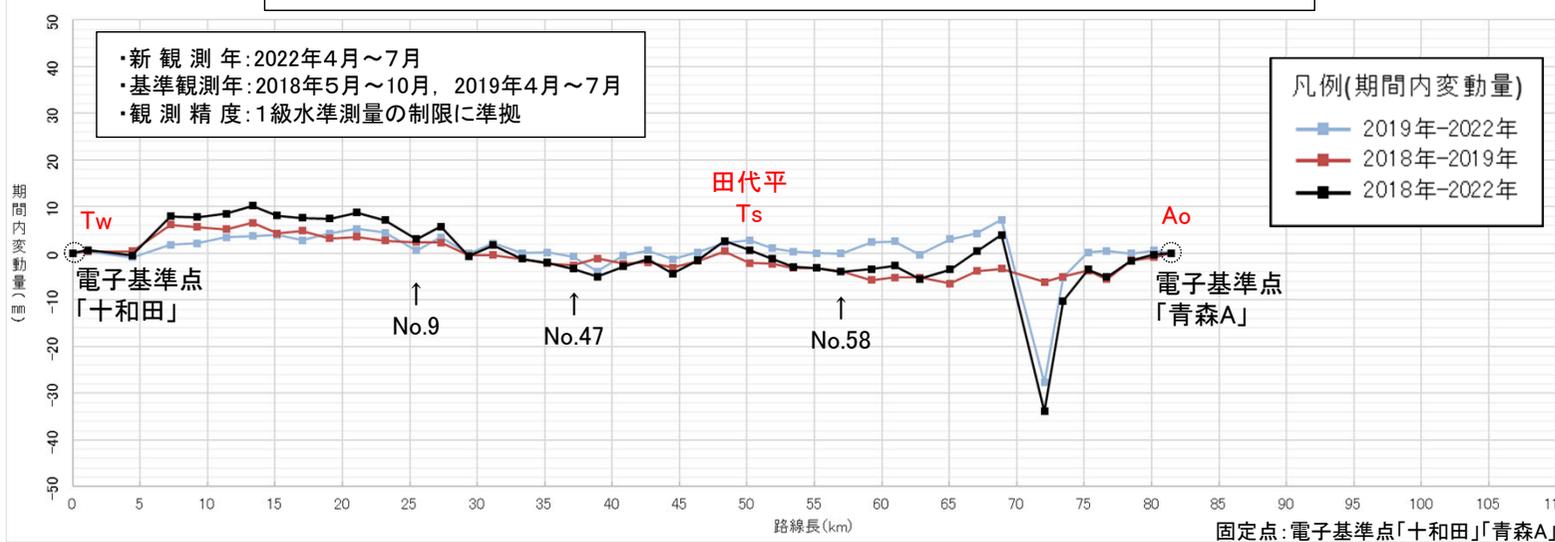


# 6.3 水準測量〔八甲田山 2018年～2022年〕

十和田市(Tw)から酸ヶ湯(Sk)を經由し青森市(Ao)へ至る路線  
(期間内変動量)



十和田市(Tw)から田代平(Ts)を經由し青森市(Ao)へ至る路線  
(期間内変動量)

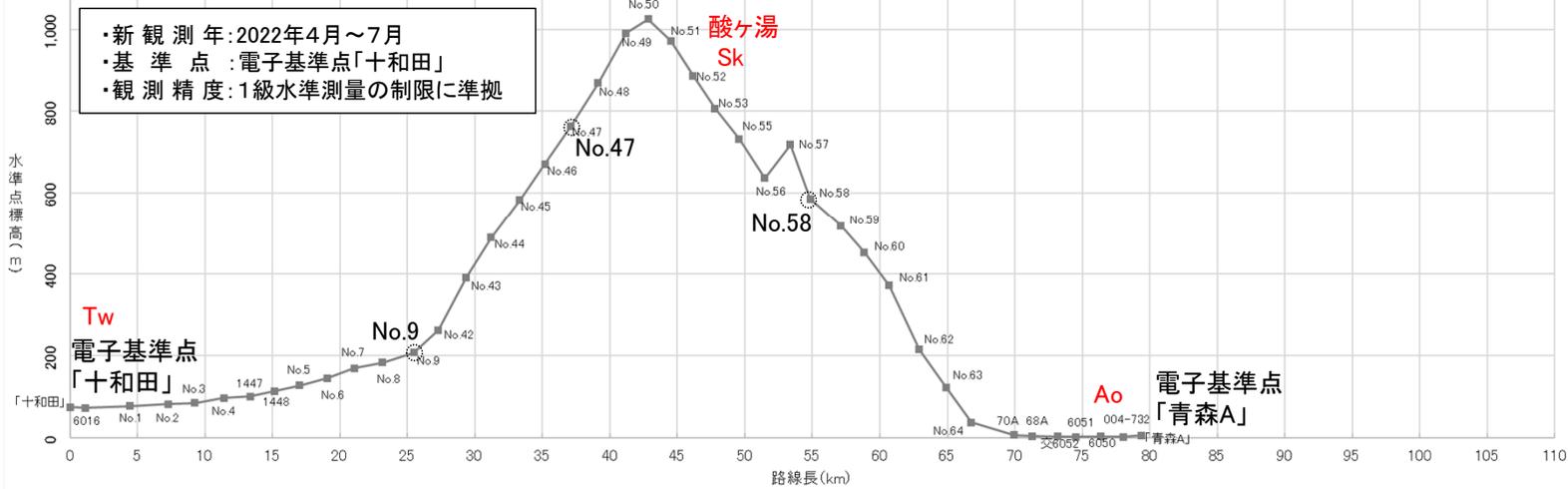


**特記事項**

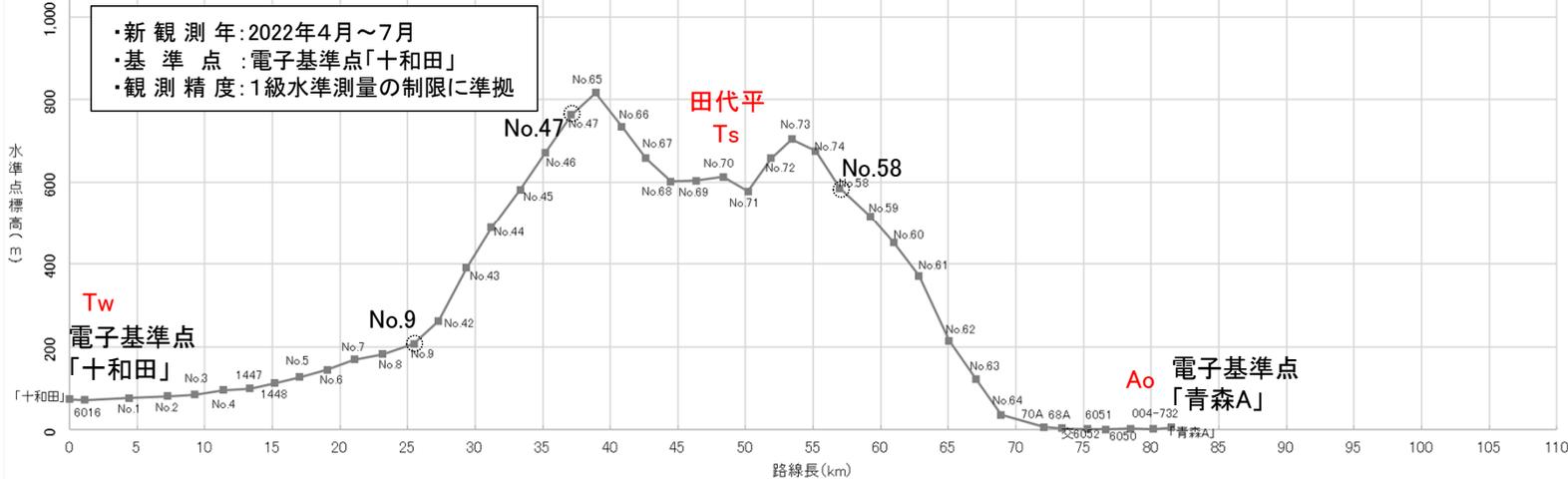
酸ヶ湯周辺や青森市街において沈降する傾向が認められるが八甲田山を中心とした、顕著な地殻変動の傾向は認められない。

# 6.3 水準測量〔八甲田山 地形断面図〕

十和田市(Tw)から酸ヶ湯(Sk)を經由し青森市(Ao)へ至る路線  
(地形断面図)



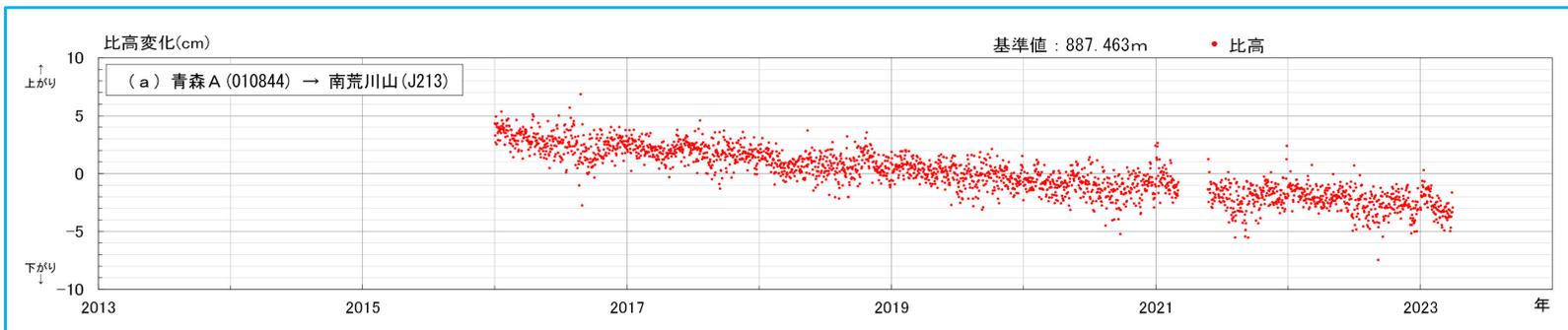
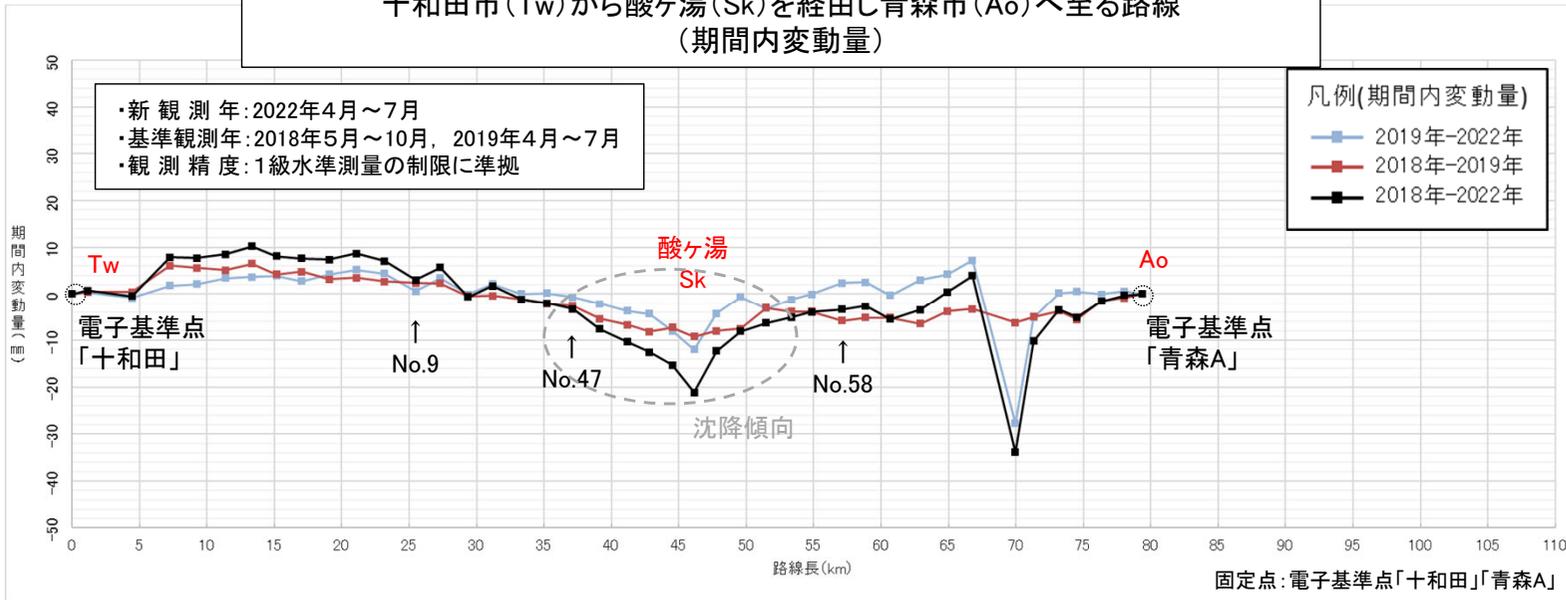
十和田市(Tw)から田代平(Ts)を經由し青森市(Ao)へ至る路線  
(地形断面図)



## 6.3 水準測量〔酸ヶ湯温泉周辺で認められる沈降傾向について〕

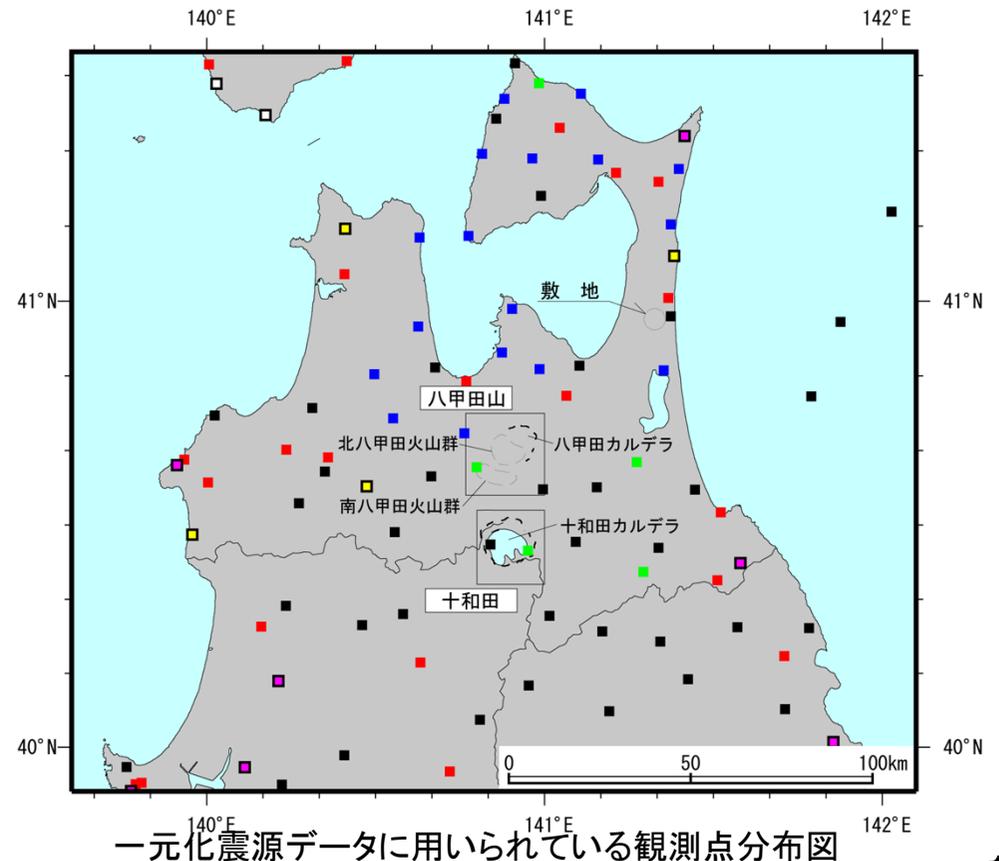
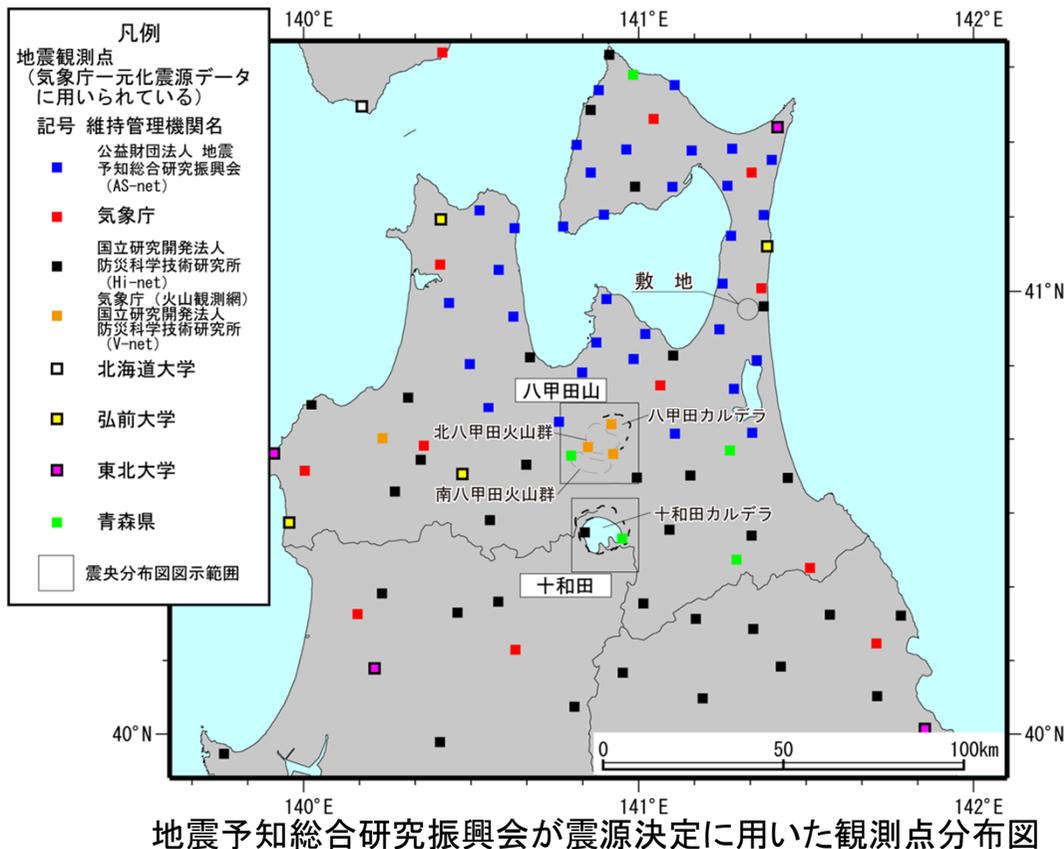
- 水準測量の結果認められた、酸ヶ湯周辺における沈降傾向について、酸ヶ湯に最も近い気象庁GNSS観測点「南荒川山」と、当社水準測量の路線でも構築されている電子基準点「青森A」からなるGNSS観測基線では、「南荒川山」が相対的に沈降する傾向が継続しており、水準測量結果と整合的である。
- 酸ヶ湯周辺が沈降傾向にある要因として、酸ヶ湯温泉をはじめとした多数の温泉施設が存在していることから、それらが影響している可能性も考えられる。引き続きデータ収集・検討を継続していく。

十和田市(Tw)から酸ヶ湯(Sk)を經由し青森市(Ao)へ至る路線  
(期間内変動量)

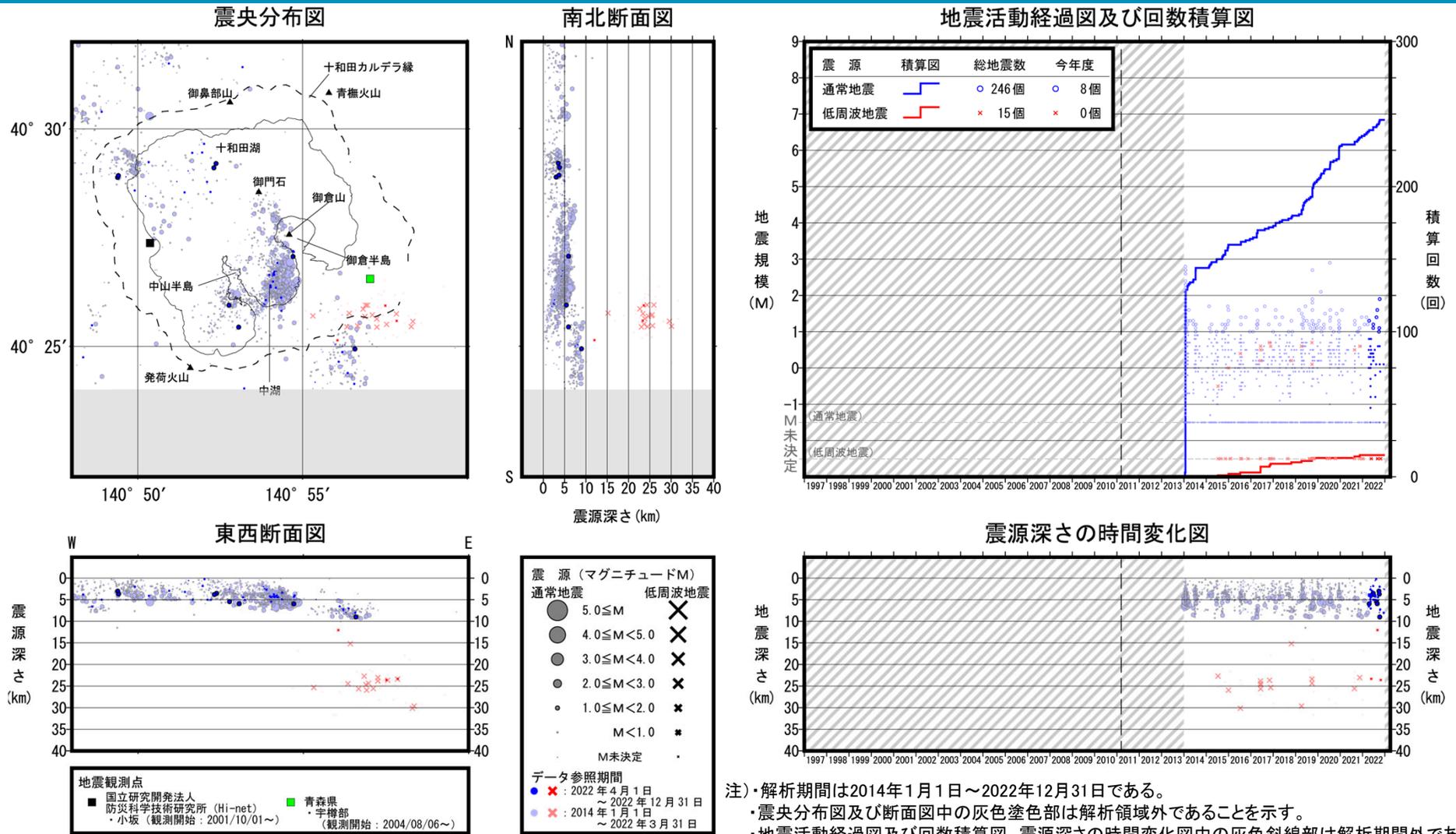


## 6.4 地震観測網の充実化

- ・地震予知総合研究振興会では、青森県を中心に高密度微小地震地震観測網(AS-net)を展開している。
- ・AS-netは36の観測点からなり、深さ約20mの地中に三成分高感度地震計と三成分強震計が設置されている。
- ・AS-netで記録された地震データは、全国地震観測データ流通ネットワークJDX-netを通じて関係研究機関にリアルタイム配信され、防災科学技術研究所のホームページで一般に配布されている。
- ・地震予知総合研究振興会において、AS-netの36観測点のほか気象庁、防災科学技術研究所、弘前大学、東北大学、北海道大学、青森県が運営する地震観測点を加えた合計140観測点の地震データを利用し自動及び手動による震源決定を行っている。
- ・上記の手動震源決定により、地殻内地震については気象庁震源カタログの約1.5倍の数の地震が震源決定されている。
- ・地震予知総合研究振興会は、2023年以降も必要に応じて観測点の増強や他機関観測点の追加により上記震源決定の精度向上を目指す予定。
- ・日本原燃は上記震源決定結果の提供をうけ、そのうち十和田および八甲田山周辺について次項以降に示す。



# 6.4 地震観測網の充実化 〔十和田(地震:震源分布とマグニチュード)【全期間】〕

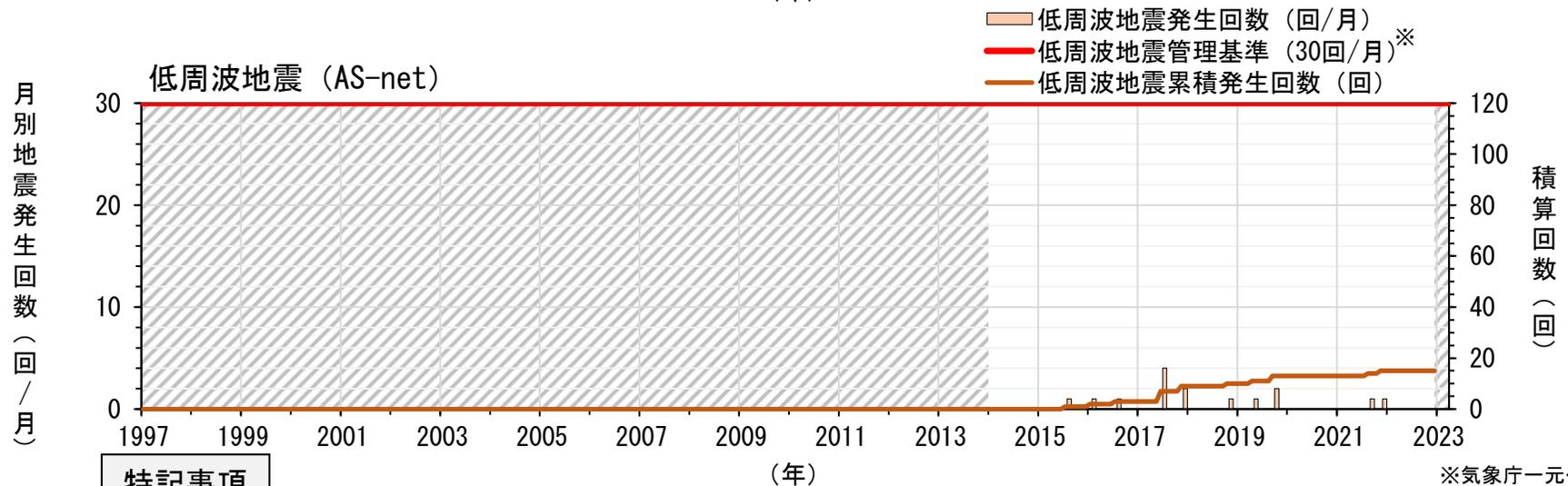
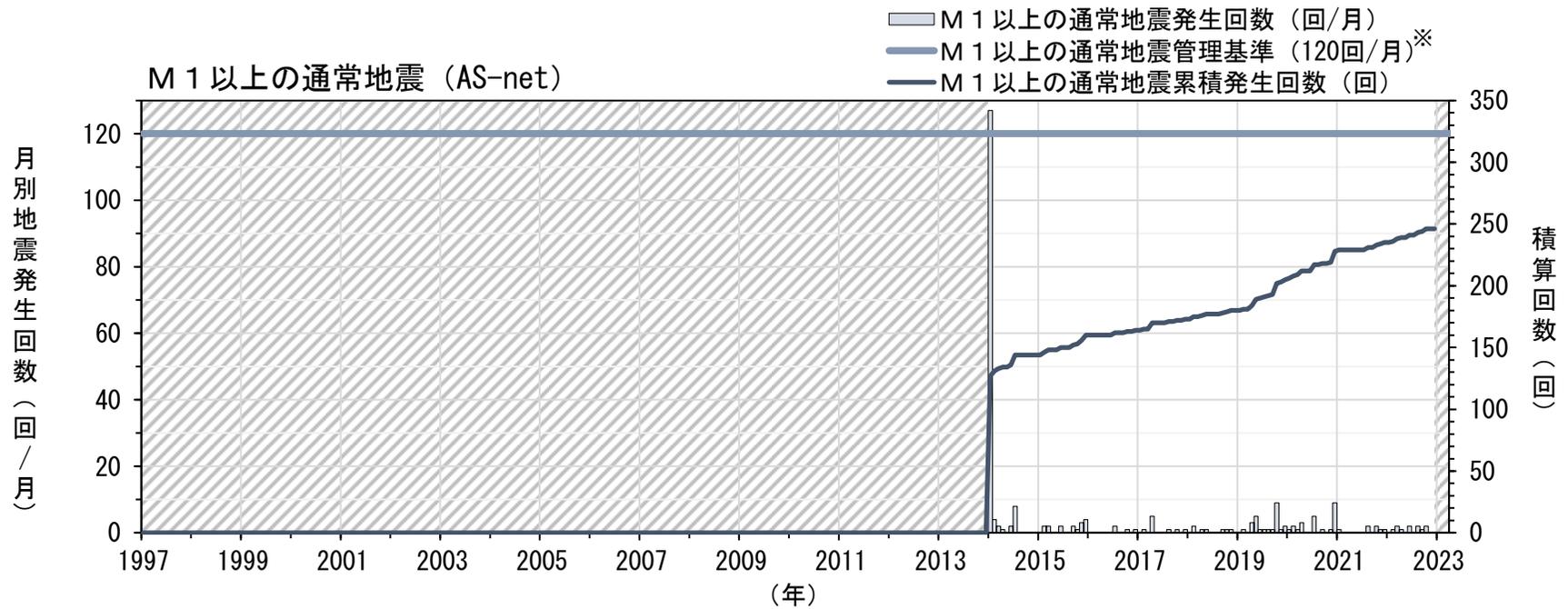


## 特記事項

中湖及びその周辺、並びにカルデラ南東縁～南東方及びカルデラ北西～北西方に震源を有する地震が観測されてきた。通常の地震は深さ約3km～約10km、低周波地震はカルデラ南東縁付近の深さ約22km～約30kmを中心に震源を有する。⇒地震の震源分布及びその発生頻度に大きな変化はなく、地震活動の活発化を示唆する顕著な変化は認められない。

注)・解析期間は2014年1月1日～2022年12月31日である。  
 ・震央分布図及び断面図中の灰色塗色部は解析領域外であることを示す。  
 ・地震活動経過図及び回数積算図、震源深さの時間変化図中の灰色斜線部は解析期間外であることを示す。  
 ・通常の地震回数はM1以上のものを積算している。低周波地震回数はMが決定したものを積算している。

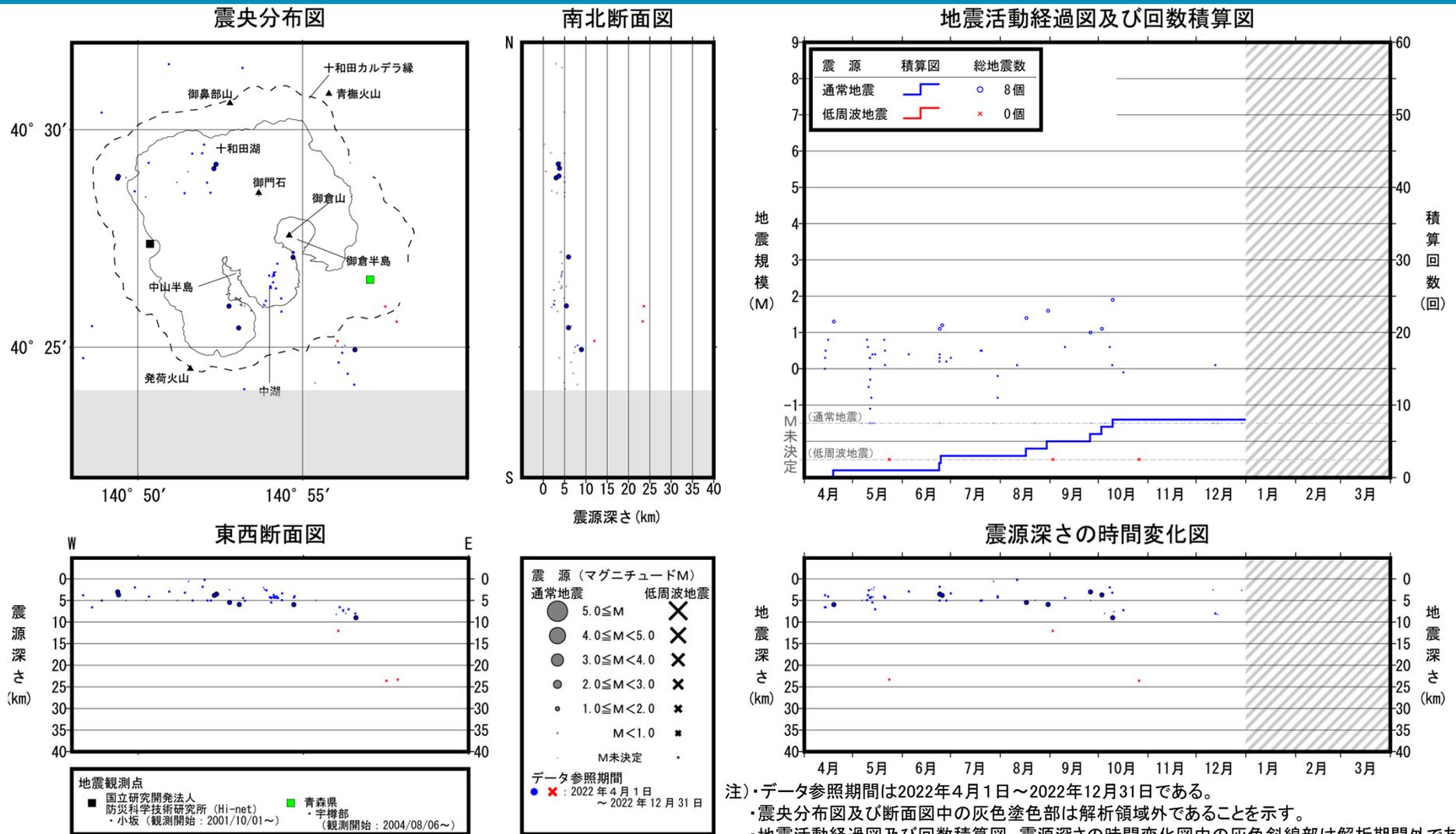
# 6.4 地震観測網の充実化 〔十和田(地震:地震発生数の推移)【全期間】〕



**特記事項**  
地震の発生頻度に大きな変化はなく、地震活動の活発化を示唆する顕著な変化は認められない。

※気象庁一元化震源に基づく管理基準

# 6.4 地震観測網の充実化 〔十和田(地震:震源分布とマグニチュード)【2022年度】〕



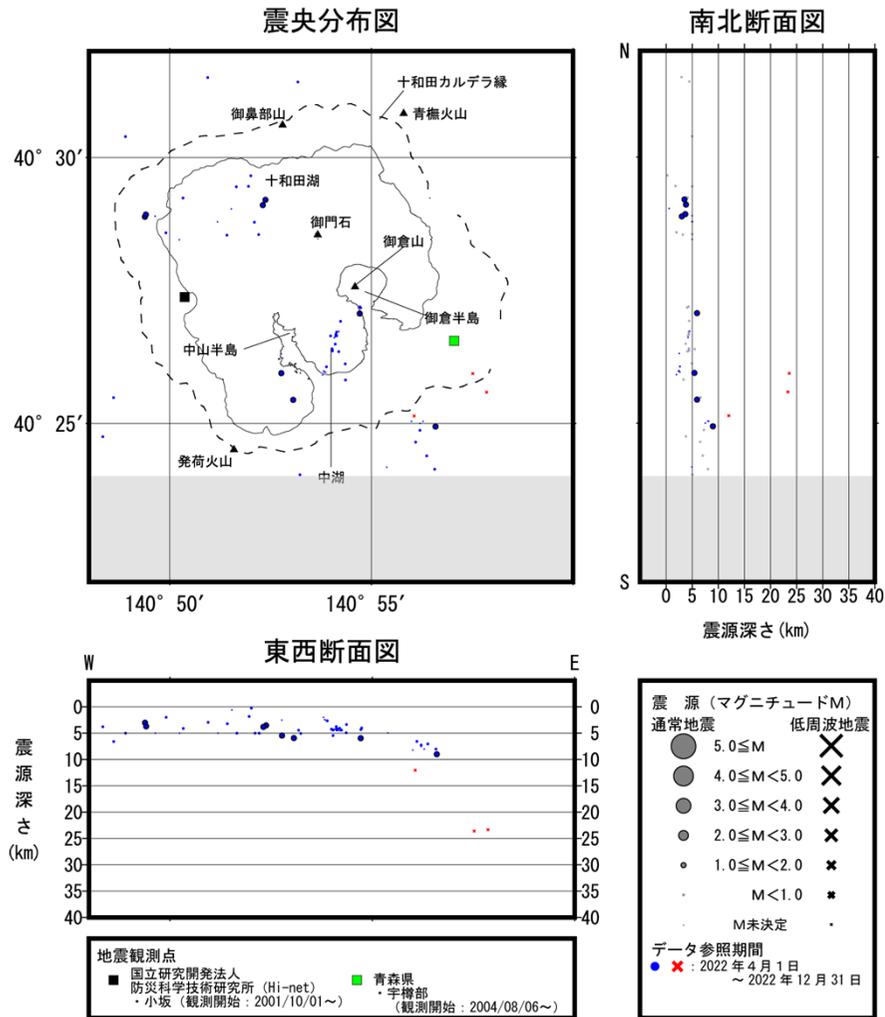
## 特記事項

2022年度では、M1以上の通常の地震が8回観測された。低周波地震(M未決定除く)は観測されていない。M1以上の通常の地震の震源位置は十和田カルデラ北西から南東縁にかけての地域である。M1以上の通常の地震の震源深さは約3km~約9kmである。

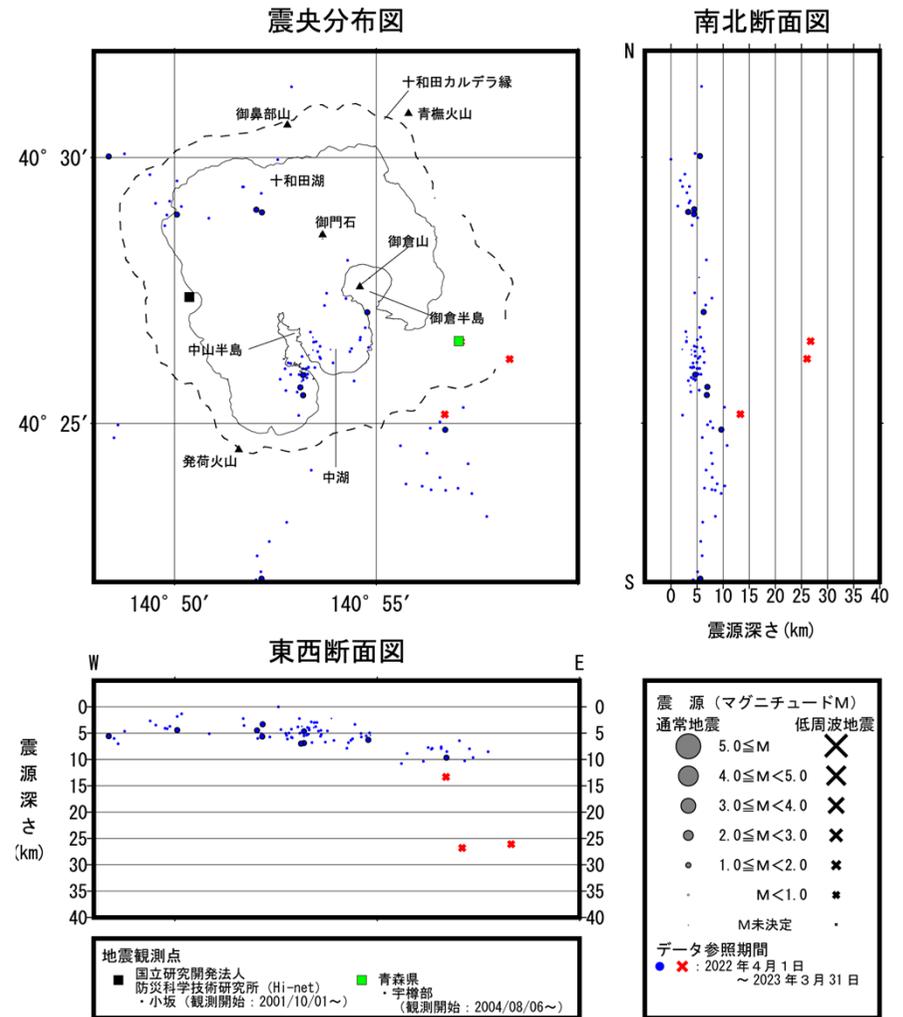
注)・データ参照期間は2022年4月1日~2022年12月31日である。  
・震央分布図及び断面図中の灰色塗色部は解析領域外であることを示す。  
・地震活動経過図及び回数積算図、震源深さの時間変化図中の灰色斜線部は解析期間外であることを示す。  
・通常の地震回数はM1以上のものを積算している。低周波地震回数はMが決定したものを積算している。

# 6.4 地震観測網の充実化 〔十和田【2022年度】気象庁一元化震源との比較〕

## AS-net



## 気象庁一元化震源



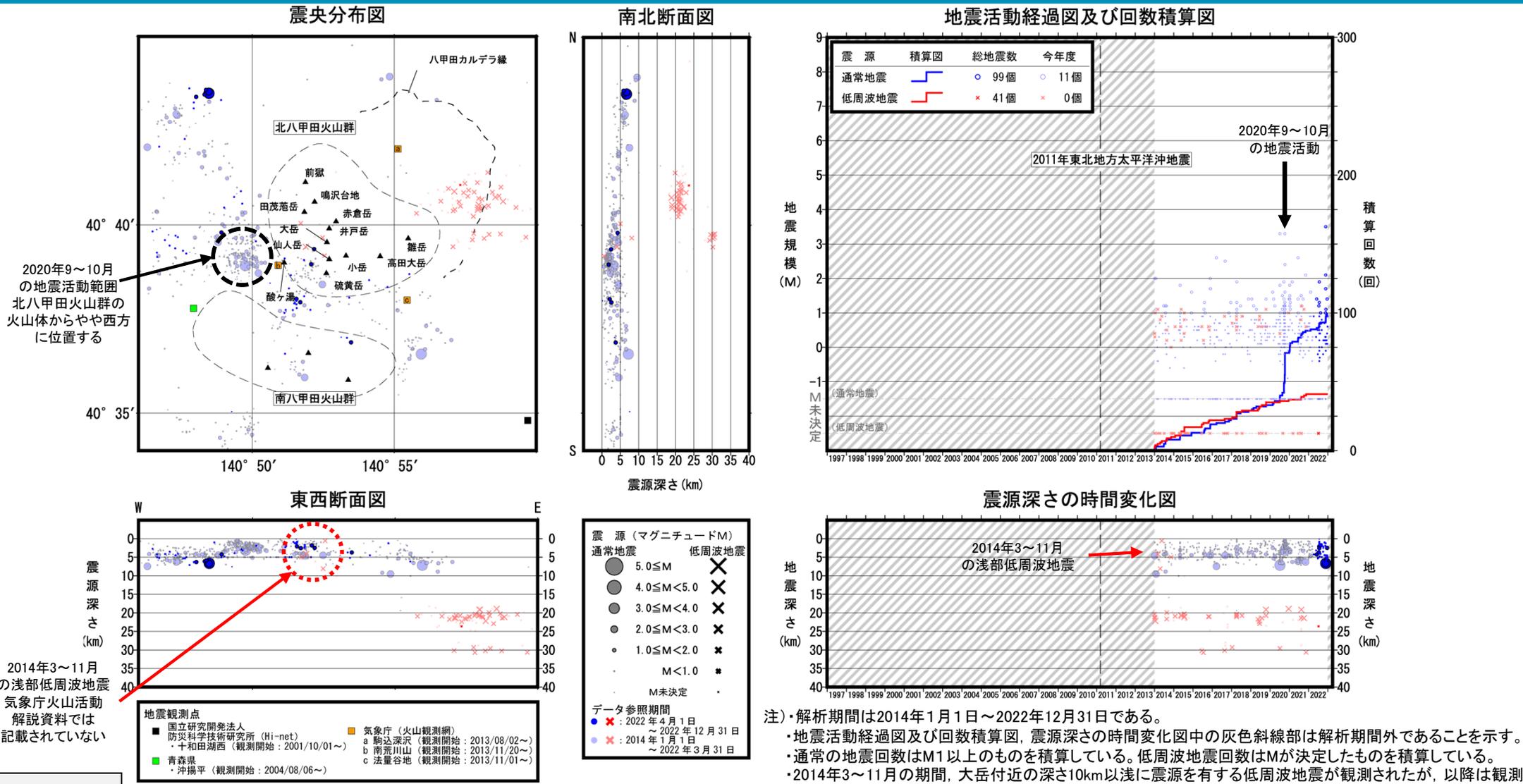
注)・データ参照期間は2022年4月1日~2022年12月31日である。  
・震央分布図及び断面図中の灰色塗色部は解析領域外であることを示す。

注)・『K:気象庁震源(決定精度が良いもの)』と『S:参考震源(決定精度が悪いもので、必要に応じて参考にするためのもの)』、『マグニチュードが求まらなかったもの』を合わせて表示している。ただし、『2:他機関依存, 3:人工地震, 4:ノイズ等』は除く。

### 特記事項

AS-netと気象庁一元化震源とは、震源分布及び地震回数において顕著な違いはみられない。

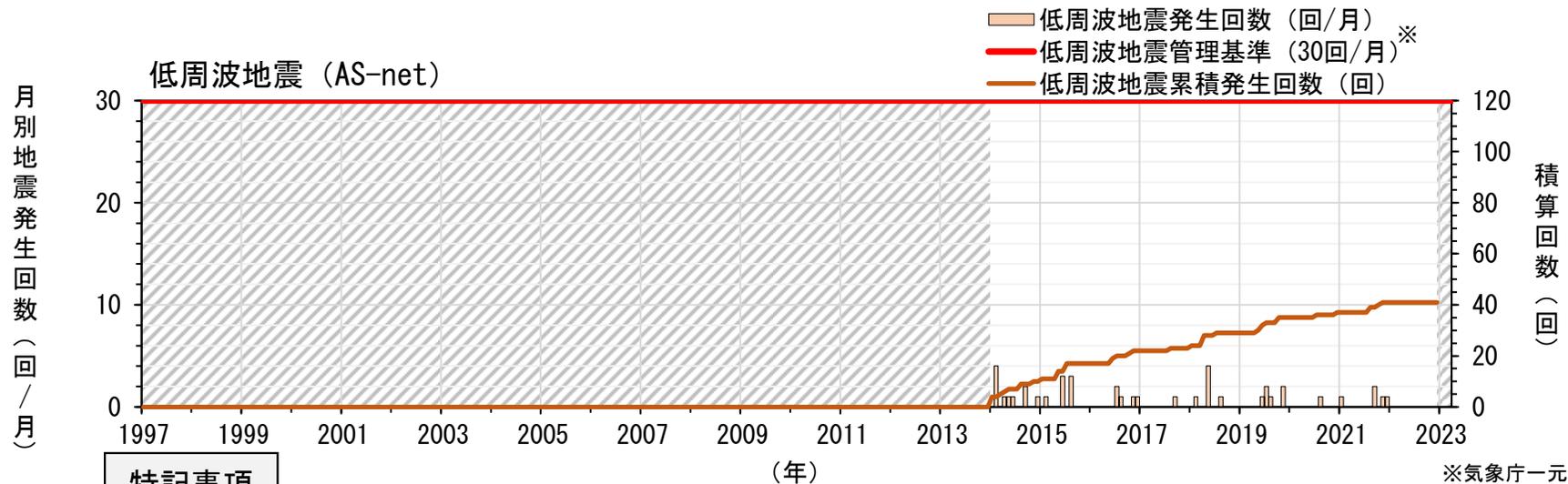
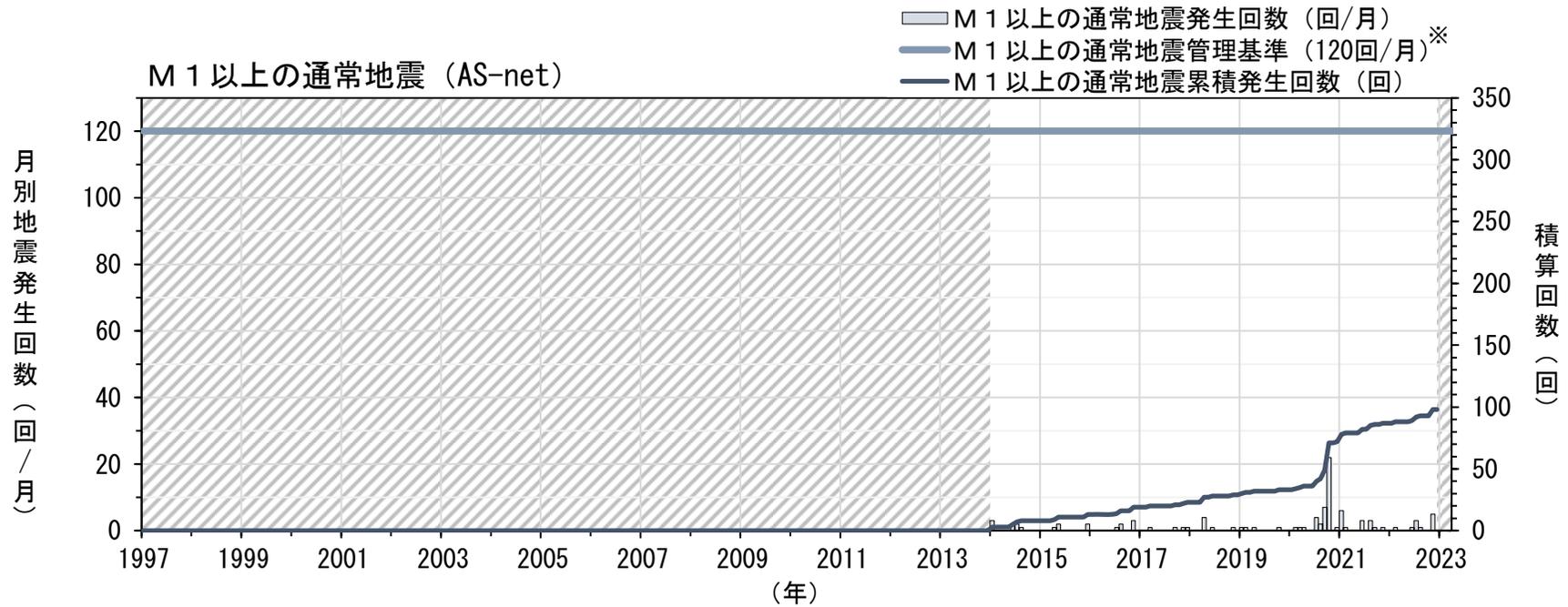
# 6.4 地震観測網の充実化 〔八甲田山(地震:震源分布とマグニチュード)【全期間】〕



## 特記事項

北八甲田火山群の大岳付近から南八甲田火山群にかけての地域、北八甲田火山群西方及び八甲田カルデラ付近に震源を有する地震が観測されてきた。通常の地震は深さ10km以浅、低周波地震は八甲田カルデラ東縁の深さ約19km～約31kmに震源を有する。  
⇒地震の震源分布及びその発生頻度に大きな変化はなく、地震活動の活発化を示唆する顕著な変化は認められない。

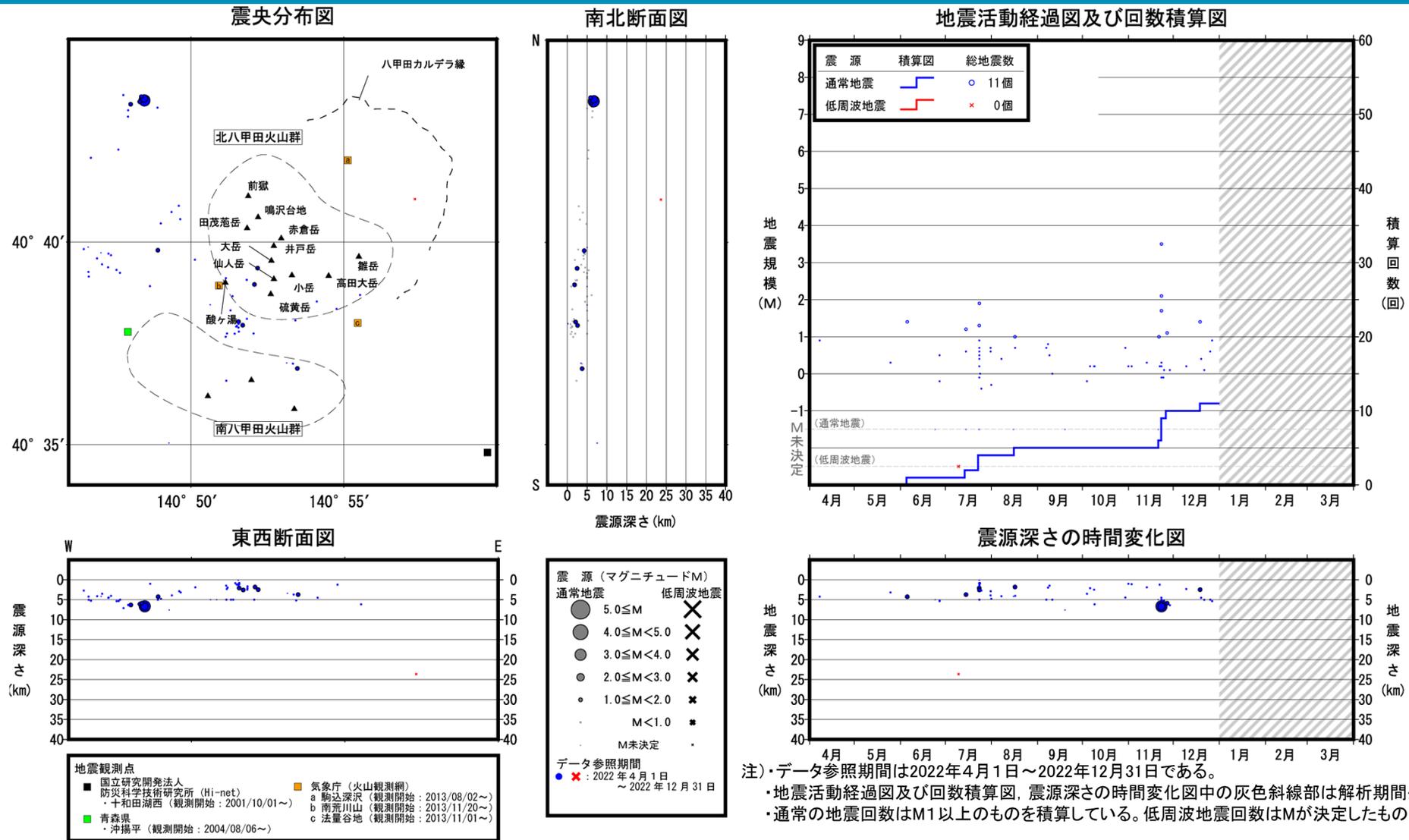
# 6.4 地震観測網の充実化 〔八甲田山(地震:地震発生数の推移)【全期間】〕



**特記事項**  
地震の発生頻度に大きな変化はなく、地震活動の活発化を示唆する顕著な変化は認められない。

※気象庁一元化震源に基づく管理基準

# 6.4 地震観測網の充実化 〔八甲田山(地震:震源分布とマグニチュード)【2022年度】〕



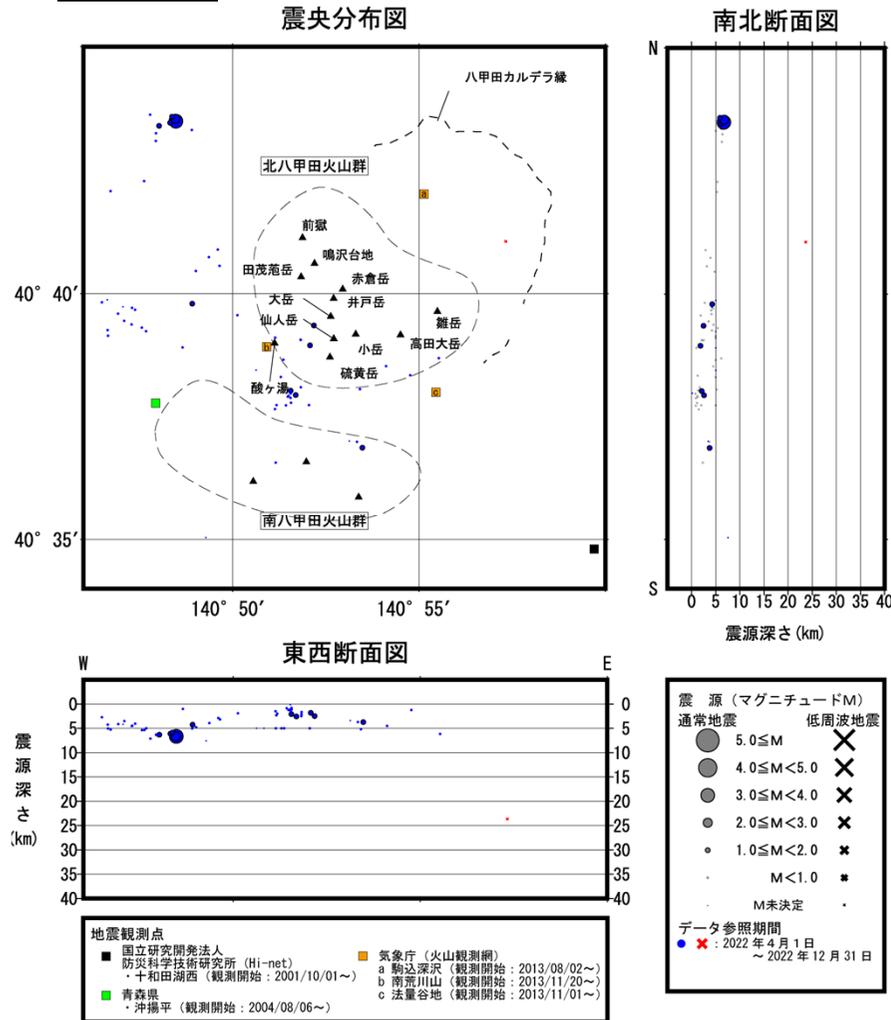
注) データ参照期間は2022年4月1日~2022年12月31日である。  
 ・地震活動経過図及び回数積算図、震源深さの時間変化図中の灰色斜線部は解析期間外であることを示す。  
 ・通常の地震回数はM1以上のものを積算している。低周波地震回数はMが決定したものを積算している。

## 特記事項

2021年度では、M1以上の通常の地震が11回観測された。低周波地震(M未決定除く)は観測されていない。  
 M1以上の通常の地震の震源位置は北八甲田火山群の西方及び北西方、大岳付近から南八甲田火山群にかけての地域である。  
 M1以上の通常の地震の震源深さは約2km~約7kmである。

# 6.4 地震観測網の充実化 〔八甲田山【2022年度】気象庁一元化震源との比較〕

## AS-net

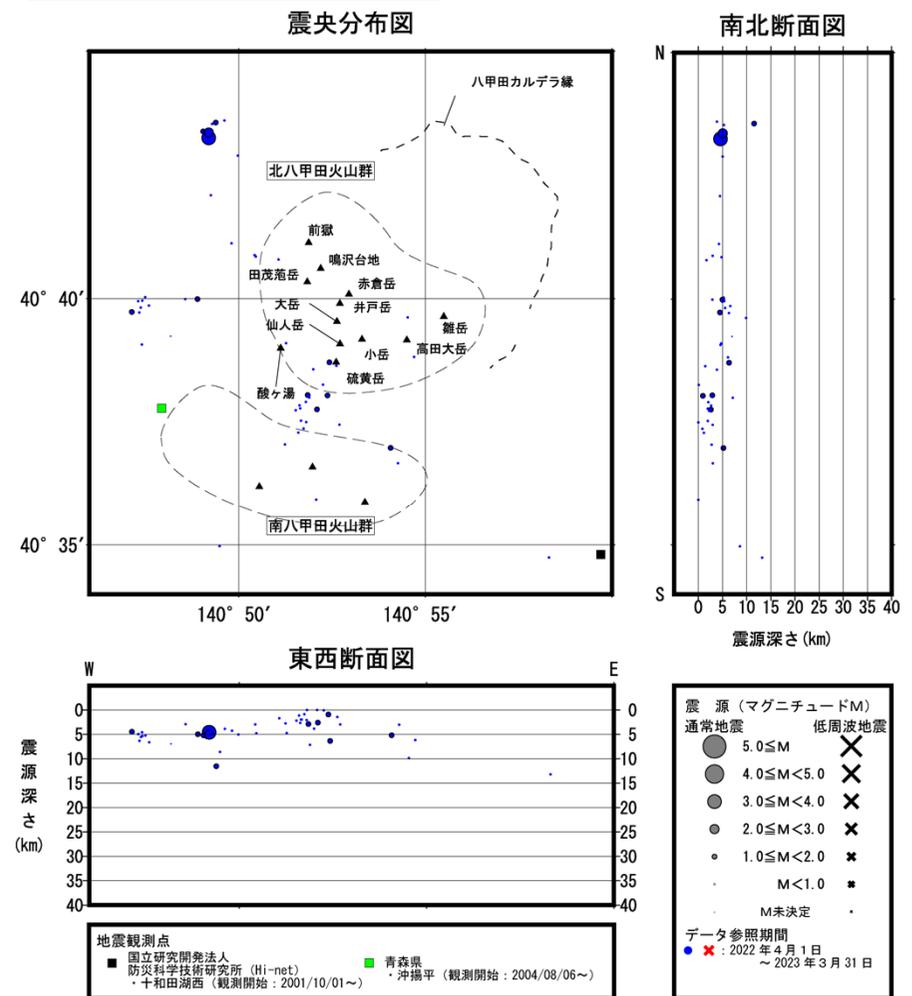


注)・データ参照期間は2022年4月1日~2022年12月31日である。

### 特記事項

AS-netと気象庁一元化震源とでは、震源分布及び地震回数において顕著な違いはみられない。

## 気象庁一元化震源



注)・『K:気象庁震源(決定精度が良いもの)』と『S:参考震源(決定精度が悪いもので、必要に応じて参考にするためのもの)』、『マグニチュードが求まらなかったもの』を合わせて表示している。ただし、『2:他機関依存, 3:人工地震, 4:ノイズ等』は除く。

## 6.5 統計モデルを用いた評価の検討[ETASモデルの概要]

- Epidemic Type Aftershock-Sequence (ETAS) モデル (Ogata, 1988, 1992) は、地震が地震を引き起こす性質を基にして間近の地震活動を予測するために開発された地震活動の時間変化を表すモデルである(尾形, 2019)。
- 「大森・宇津公式」の余震減衰の考え方に、すべての地震がその規模に応じて余震を起こすというアイデアを取り入れたものである(尾形, 2019)。
- ETASモデルは、時刻 $t$ でのマグニチュード  $M_c$  以上の地震 ( $M_i \geq M_c$ ) の発生強度  $\lambda$  を予測するために、過去の地震データ  $\{(t_i, M_i); i=1,2,\dots,N\}$  からの余震減衰曲線の重ね合わせで表現している(尾形, 2019)。
- ある期間に発生したマグニチュード  $M_c$  以上の地震のデータを与えれば、モデルの5個のパラメータ  $\mu, K, a, c, p$  の最尤推定値を求めることができる(宇津, 1996)。

$$v(t) = \frac{K}{(t+c)^p} \quad \dots\dots\dots \text{大森・宇津公式}$$

$t$ : 本震の発生時刻からの経過時間。

$K, c, p$ : データから計算される余震活動の特徴づける定数。

大森・宇津公式  
の余震減衰曲線  
の重ね合わせ

$$\lambda(t|H_t) = \mu + \sum_{t_i < t} \frac{K_i}{(t-t_i+c)^p} \quad \dots\dots\dots \text{ETASモデル (Ogata, 1988, 1992)}$$

$K_i$ : 各地震について定まるべき定数で、付随する地震のクラスター数の大小に関係する。そのクラスターの規模の大小は先頭の地震の  $M_i$  に見合ったものになり、以下のような指数関数の式で表される。

$$K_i = K e^{a(M_i - M_c)}$$

$\mu$ : ポアソンの発生強度を示すパラメータ。

「常時発生強度」と呼び、地域特有の地震発生の基礎的な強さを表す。

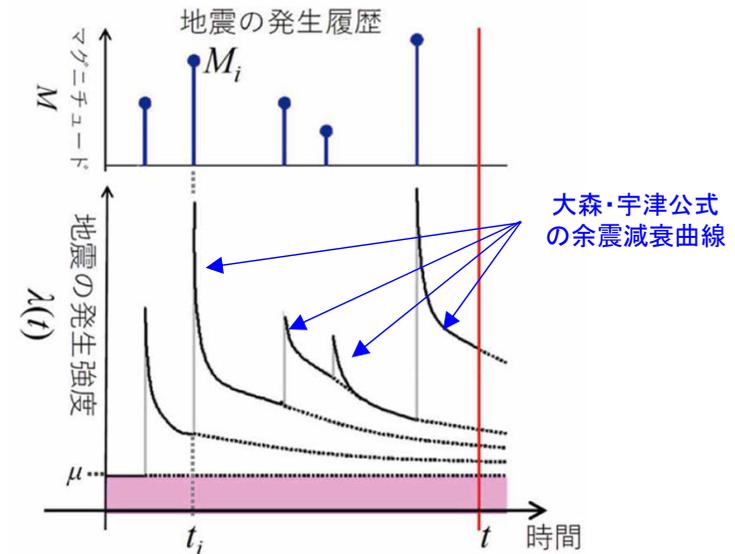
$K$ : 活発さの程度を表す。余震の特徴づける定数。

$a$ : 群れの大きさに対するマグニチュードの効率性を示す。本震とは余震の違いがはっきりしているパターンは大きい値、群発地震のように地震の大小が群れのサイズにそれほど効かない場合は小さい値をとる。

$c$ : 時間軸の調整をするパラメータ。余震の特徴づける定数。

$p$ : クラスターの地震群の時間経過に関する減衰の早さを示す。

余震の特徴づける定数。



ETASモデルの模式図  
(尾形, 2019に加筆)

Yoshihiko Ogata (1988): Statistical Models for Earthquake Occurrences and Residual Analysis for Point Processes. Journal of the American Statistical Association, 83, 401, pp.9-27.

Yoshihiko Ogata (1992): Detection of Precursory Relative Quiescence Before Great Earthquakes Through a Statistical Model. J. Geophys. Res., 97, pp.19845-19871.

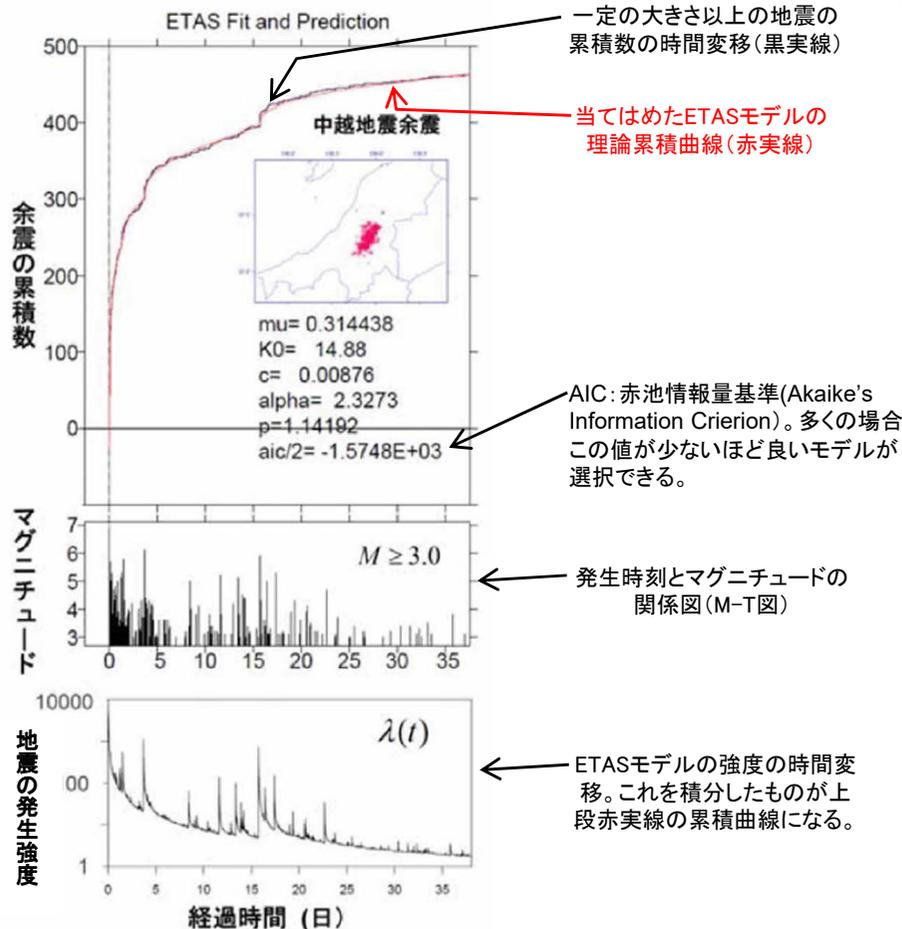
宇津 徳治 (1996): 東海地域とその周辺の地震活動— ETASモデルによる解析—. 地震予知連絡会会報, 56, pp. 313-317.

尾形 良彦 (2019): ETASモデル—地震の発生強度(起こりやすさ)の評価—. なみふる, 117, pp. 2-3.

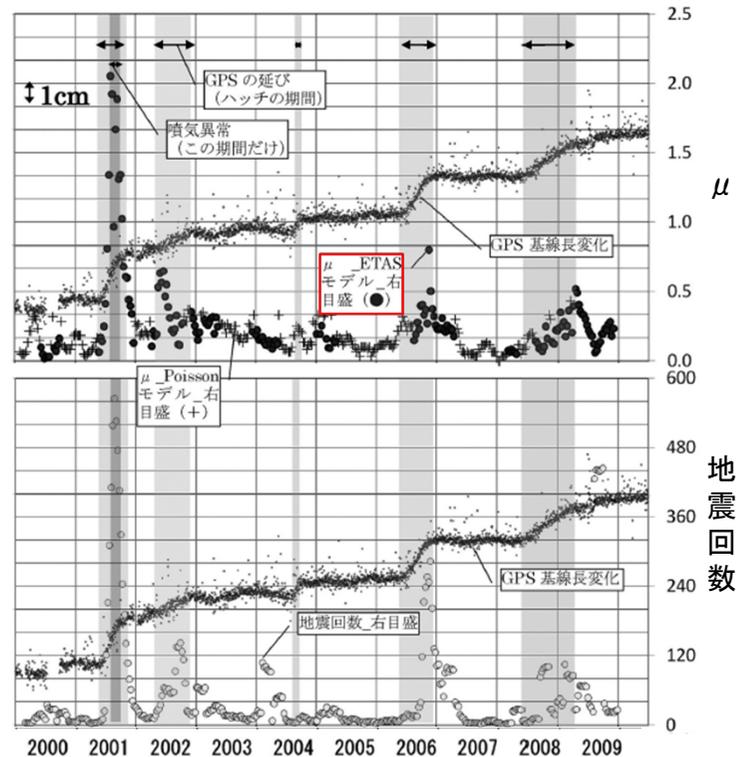
## 6.5 統計モデルを用いた評価の検討[ETASモデルの事例]

- ETASモデルによる発生地震の期待数には、発生強度  $\lambda$  を積分する。
- 下左図は余震系列や広域の地震データにETASモデルを当てはめた事例である。ETASモデル(赤実線)は、実際の地震の累積数(黒実線)によく重なりあうことがわかる。

- 過去の火山性地震にETASモデルを適用し、火山活動度の定量化を試みる研究事例として、箱根山(石垣ほか, 2010)、伊豆半島東方沖(Kumazawa et al, 2016)等があげられる。
- 石垣ほか(2010)は、神奈川県温泉地学研究所の震源データを使用し、箱根山周辺の2000年~2009年の期間でETAS解析を実施した結果、箱根山のETASの  $\mu$  値は噴火異常、短期の地殻変動(GPS)と良い相関があることを示した。



2004年新潟県中越沖地震後約1か月の余震活動  
ETASモデルの解析例(尾形, 2019に加筆)



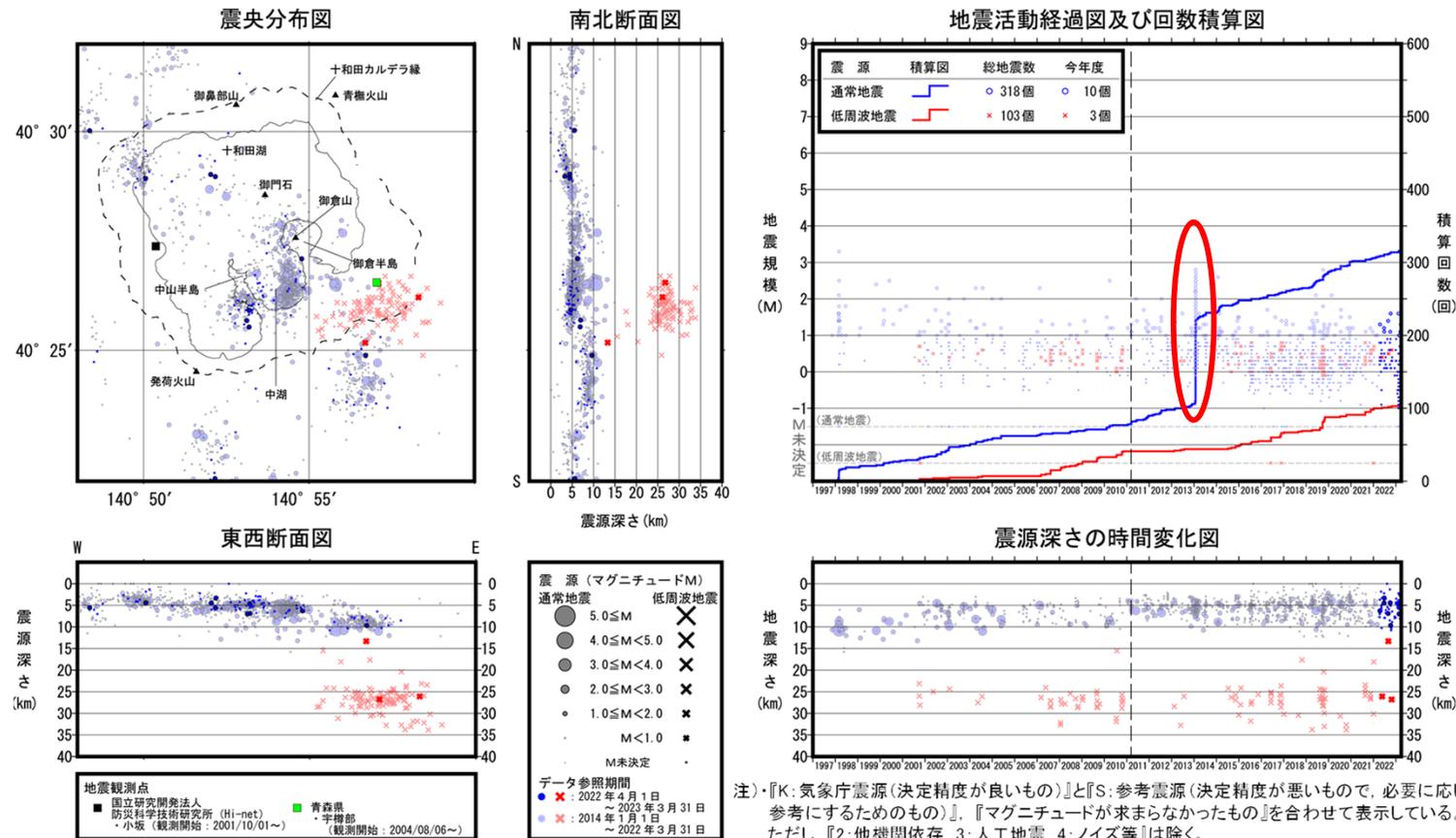
←GPS 観測結果と箱根の地震活動パラメータの関係。  
ハッチをかけた時期はGPSの短期の伸びがみられた期間であり、噴気異常が見られた時期(2001/7/19 ~ 8/7)はさらに濃いハッチをかけている。(石垣ほか, 2010に抜粋・加筆)

石垣 祐三, 原田 昌武, 本多 亮, 行竹 洋平, 伊東 博, 明田川 保(2010): 箱根浅発地震活動のETASモデル解析と火山活動度との関連の検討。神奈川県温泉地学研究所報告, 42, pp.19-31.

Takao Kumazawa, Yshiko Ogata, Kazuhiro Kimura, Kenji Maeda, Akio Kobayashi (2016): Background rates of swarm earthquakes that are synchronized with volumetric strain changes. Earth and Planetary Science Letters. 442, pp.51-60.

## 6.5 統計モデルを用いた評価の検討[ETASモデルの評価対象火山への適用]

- 当社の火山モニタリング評価対象火山である十和田および八甲田山は、地震計が設置されて以降の噴火実績がなく、地震と噴火の定量的な関係は不明であるため、現状では過去最多の地震回数を判断基準としている。
- ETASモデルを用いれば、下図の赤丸で示すような一時的な地震活動の活発化や地震発生頻度の変化を異常として捉えられる可能性がある。
- しかし、ETASモデルを火山活動の将来予測に適用した事例はまだなく、予測手法が確立していない。
- ETASモデルを用いた将来予測への適応事例や、統計的なモニタリング手法に係る知見の収集を継続して実施し、当社モニタリングへの適応可能性を検討していく。



本編資料より再掲加筆

注)・『K:気象庁震源(決定精度が良いもの)』と『S:参考震源(決定精度が悪いもので、必要に応じて参考にするためのもの)』、『マグニチュードが求まらなかったもの』を合わせて表示している。ただし、『2:他機関依存, 3:人工地震, 4:ノイズ等』は除く。  
 ・通常地震回数はM1以上のものを積算している。低周波地震はMが求まらなかったものを除いて積算している。  
 ・震源データについては、2016年4月以降、PF法を用いた自動震源決定手法の導入により震源決定総数が増加。

## 7. 原子力規制委員会の火山モニタリングにおける 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」 を踏まえた整理

## 7. 1 十和田

- ・十和田について「観測データに有意な変化があったと判断する目安」を踏まえた整理を行い、全ての監視項目において有意な変化がないことを確認した。
- ・以下の整理のほか、十和田の巨大噴火を引き起こしたマグマが蓄積した温度・圧力条件(Nakatani et al., 2022)や、十和田地下における予備的な比抵抗構造解析(産業技術総合研究所, 2022)に関する知見は、十和田の地下構造に関する評価の高度化につながる情報となりうるため、引き続き情報収集を行っていく。

監視項目		確認したデータ		確認結果		
			頁			
① 主な監視項目	地震活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本資料</li> <li>・十和田の火山活動解説資料(令和4年4月～令和5年4月)</li> </ul>		20-28 71	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地震発生領域の拡大または消滅、新たな地震発生領域の出現は認められない</li> <li>・地震発生数の急激な変化は認められない</li> </ul>	
		地殻変動・地盤変動	GNSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本資料</li> <li>・十和田の火山活動解説資料(令和4年4月～令和5年3月)</li> </ul>		12-19 71
	水準測量		<ul style="list-style-type: none"> <li>・中・長期的取組み</li> </ul>		98	
	衛星観測		<ul style="list-style-type: none"> <li>・中・長期的取組み</li> <li>・第151回火山噴火予知連絡会資料</li> </ul>		91,93-95 74	
	傾斜計		<ul style="list-style-type: none"> <li>・中・長期的取組み</li> </ul>		90	
	表面活動	火山ガス熱活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>・十和田の火山活動解説資料(令和4年4月～令和5年3月)</li> <li>・第151回火山噴火予知連絡会資料</li> </ul>		71 72	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既往の火山ガス放出場所の拡大または消滅、放出場所の出現は認められない</li> <li>・火山ガスの放出量に急激な変化は認められない</li> </ul>
② その他の監視項目	噴出場所及び噴出物	十和田の火山活動解説資料(令和4年4月～令和5年3月)			<ul style="list-style-type: none"> <li>・既往の火口の拡大や消長、新たな火口や火道の形成は認められない</li> <li>・マグマ成分の物理的・化学的性質に急激な変化があったとする科学的知見は認められない</li> </ul>	
	噴火様式	十和田の火山活動解説資料(令和4年4月～令和5年3月)			<ul style="list-style-type: none"> <li>・噴煙柱高度が数十km程度のプリニー式噴火を伴うような噴火は認められない</li> </ul>	
	地下構造	比抵抗	Kanda and Ogawa(2014)			<ul style="list-style-type: none"> <li>・地殻内に推定される低速度及び低比抵抗領域の拡大または消滅、新たな低速度及び低比抵抗領域が出現したとする科学的知見は認められない</li> </ul>
地震波速度	Nakajima et al.(2001) 中島(2017) 日本列島下の三次元地震波速度構造(2022年版)					

Wataru Kanda and Yasuo Ogawa (2014): Three-dimensional electromagnetic imaging of fluids and melts beneath the NE Japan arc revisited by using geomagnetic transfer function data. Earth, Planets and Space, 66, doi:10.1186-1880-5981-66-39.  
 Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Zhao, D.(2001): Three-dimensional structure of  $V_p$ ,  $V_s$  and  $V_p/V_s$  and beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids. Journal of Geophysical Research, 106, pp.21,843-21,857.  
 中島淳一(2017): 東北地方の火山周辺の地震波速度・減衰構造: 地殻構造と低周波地震・S波反射面との関係. 東京大学地震研究所集報, 92, pp.49-62.  
 防災科学技術研究所HP (https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/sokudo\_kozo/) 上の「日本列島下の三次元地震波速度構造(2022年度版)」(解析手法等の詳細はMatsubara et al.(2022)に記載)  
 Takayuki Nakatani, Takashi Kudo, and Toshihiro Suzuki (2022): Experimental Constraints on Magma Storage Conditions of Two Caldera-Forming Eruptions at Towada Volcano, Japan. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), vol.127, issue 5, e2021JB023665.  
 国立研究開発法人産業技術総合研究所(2022): 巨大噴火プロセス等の知見整備に係る研究, 令和3年度原子力規制庁委託成果報告書, 令和4年3月, 416p.

## 7.2 八甲田山

・八甲田山について「観測データに有意な変化があったと判断する目安」を踏まえた整理を行い、全ての監視項目において有意な変化がないことを確認した。

監視項目		確認したデータ		確認結果	
			頁		
① 主な監視項目	地震活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本資料</li> <li>・八甲田山の火山活動解説資料 (令和4年4月～令和5年3月)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>40-48</li> <li>76</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>・地震発生領域の拡大または消滅, 新たな地震発生領域の出現は認められない</li> <li>・地震発生数の急激な変化は認められない</li> </ul>	
	地殻変動 地盤変動	GNSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>・本資料</li> <li>・八甲田山の火山活動解説資料 (令和4年4月～令和5年3月)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>32-39</li> <li>76</li> </ul>
		水準測量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中・長期的取組み</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>100</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>・既往の傾向と比較して, 急激な変化は認められない</li> <li>・既往の地殻変動と異なる場所での地殻変動の出現は認められない</li> </ul>
		衛星観測	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中・長期的取組み</li> <li>・第151回火山噴火予知連絡会資料</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>92-95</li> <li>79</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>・傾斜計による地盤変動の急激な傾向の変化は認められない</li> </ul>
		傾斜計	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中・長期的取組み</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>90</li> </ul>
	表面活動	火山ガス熱活動	<ul style="list-style-type: none"> <li>・八甲田山の火山活動解説資料 (令和4年4月～令和5年3月)</li> <li>・第151回火山噴火予知連絡会資料</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>76</li> <li>77</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>・既往の火山ガス放出場所の拡大または消滅, 放出場所の出現は認められない</li> <li>・火山ガスの放出量に急激な変化は認められない</li> </ul>
② その他の監視項目	噴出場所及び噴出物	<ul style="list-style-type: none"> <li>十和田の火山活動解説資料 (令和4年4月～令和5年3月)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・既往の火口の拡大や消長, 新たな火口や火道の形成は認められない</li> <li>・マグマ成分の物理的・化学的性質に急激な変化があったとする科学的知見は認められない</li> </ul>	
	噴火様式	<ul style="list-style-type: none"> <li>十和田の火山活動解説資料 (令和4年4月～令和5年3月)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>・噴煙柱高度が数十km程度のプリニー式噴火を伴うような噴火は認められない</li> </ul>	
	地下構造	比抵抗	小川(1991)		<ul style="list-style-type: none"> <li>・地殻内に推定される低速度及び低比抵抗領域の拡大または消滅, 新たな低速度及び低比抵抗領域が出現したとする科学的知見は認められない</li> </ul>
地震波速度		<ul style="list-style-type: none"> <li>Nakajima et al.(2001)</li> <li>中島(2017)</li> <li>日本列島下の三次元地震波速度構造(2022年版)</li> </ul>			

小川康雄(1991): 八甲田火山群の深部比抵抗構造に関する考察, 地質調査所報告, 275, pp.83-95.