

## 十和田火山の中湖湖底における熱水湧出を示唆する音響異常

## 概要

十和田湖において高分解能音波地層探査を行ったところ、中湖の湖底から熱水が湧出している可能性を示す音響異常が認められた。十和田湖の中湖の深層水温は、5℃前後とやや温度が高いことが古くから知られており、それは湖底から比較的暖かい湧泉があるためと考えられてきた。そのため、この中湖の湖底の音響異常は熱水湧出を示している可能性が高い。また、熱水湧出は少なくとも100年程度は続いていると考えられる。

2014年9月に十和田湖全域で音波地層探査を行い、湖底下10～20mまでの高分解能な地質構造を得ることができた。音波地層探査はSES2000-standard(識別分解能5cm以上)を使用し、慣性GNSSジャイロセンサーとRTK-GNSSを組み合わせた動揺補正と位置決定を行って実施した。音速の補正に使用した温度構造は観測期間中にMinos Xを使用してCTD観測を行い取得した。

その結果、湖全体で高分解能な地質構造が得られたが、湖最深部(水深326.8m)がある中湖(図1)の湖底の一部では、音波記録が途切れ湖底面とその下の成層した地下構造が見えなくなる地点が認められ、その直上の湖水中に音響異常が認められた(図2)。この音響異常は、活動中の海底火山や海底の熱水鉱床から発生する熱水プリュームに起因する音響異常に類似する。そのため、中湖の湖底で熱水湧出がおきている可能性が示唆される。

古くから十和田湖では、特に中湖の水深の深い部分において鉛直方向の水温構造に異常が認められている(吉村, 1930, 1976; 庄司ほか, 1985; 對馬・生魚, 2024)。それは、温帯に属する深い湖沼における夏期の水温鉛直変化は、約100m以深に4℃台、200m以深は約3.6～3.8℃を示すが普通とされ、実際、田沢湖、支勿湖等ではこの様な水温の鉛直変化が観測されている(庄司ほか, 1985)。しかし、十和田湖は深い温帯湖でありながら、深水層に4℃以下の水温を持たず、湖底に向かい徐々に水温が上昇し、水深150m以上の水温は、通年を通して5℃程度であることが知られている(吉村, 1930, 1976; 庄司ほか, 1985; 對馬・生魚, 2024)。この水温異常の原因は、湖底部に比較的暖かい湧泉が存在するためと推定されている(吉村, 1973; 庄司ほか, 1985; 對馬・生魚, 2024)。

このような湖水温の鉛直方向の異常もあわせて考えると、中湖で観測された音響異常は、湖底からの熱水湧出を示している可能性が高いと考えられる。また、深水層の温度異常が100年間ほど認められ続けているので、熱水の湧出は一時的でなく少なくとも100年程度は続いていると考えられる。

本成果は、原子力規制庁「平成26年度火山影響評価に係る知見の整備」で行ったものの一部である。



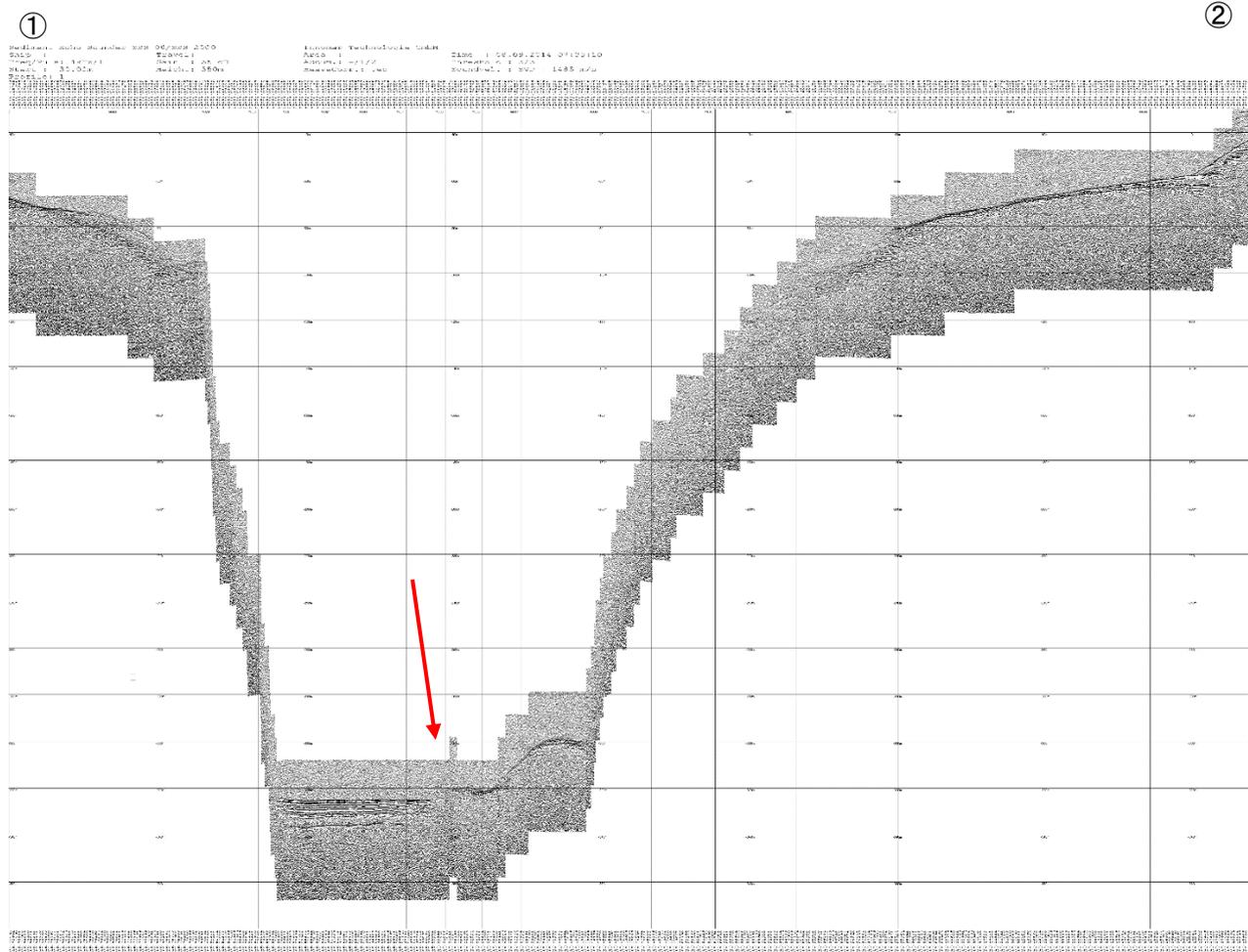


図2 音波地層探査結果

側線は図1に示す。図2中の赤矢印の位置に熱水湧出と考えられる音響異常が認められる。中湖湖底の平坦面上の小丘で音響異常が認められる。

引用文献

庄司博光・奈良忠明・小山田久美子・野田正志・早狩敏男・野呂幸男・佐藤信博（1985）十和田湖の水環境-鉛直構造-。青森県公害センター所報，7号，90-94.

對馬 就・生魚利治（2024）十和田湖中湖における鉛直方向の水質特性について。秋田県健康環境センター年報，20号，44-47.

吉村信吉（1930）深い温帯期の深層水温，海と空，423-439.

吉村信吉（1976）湖沼学増補版。生産技術センター，p.142.

## 十和田火山における3次元比抵抗構造

## 概要

十和田湖周辺の約40km四方の領域で60測点を設け、広帯域MT法探査を行い、地下比抵抗構造を明らかにした。十和田湖周辺では変質鉱物によると考えられる低比抵抗域が点在している。一方、十和田湖内では中湖を中心としたじょうご状の低比抵抗域が浅部にある。そこから深部へ向けて円柱状の低比抵抗域が伸びており、マグマからの脱ガス成分を含む高温の火山性流体の上昇域を示している可能性を上げられる。重力異常と対比することにより、浅部のじょうご状の構造はカルデラの陥没地形を充填した未固結の火砕流堆積物を表していると考えられる。

原子力規制庁「巨大噴火プロセス等の知見整備に関わる研究」の一環として、十和田火山の地下比抵抗構造を把握するために広帯域MT法調査を2021、2022年に実施した。詳細は原子力規制庁報告書(2023、2024)を参照していただきたい。

本報告では、WSINV3DMTを用いた3次元比抵抗構造のインバージョンの結果から、特徴的な比抵抗構造についての概略を示す(図1)。標高300~350mでは御倉半島や中山半島の溶岩ドーム構造を表す $1,000\ \Omega\cdot\text{m}$ 以上の高比抵抗が顕著である。海拔下200~300mでは十和田湖周辺で $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 程度の低比抵抗域が点在する。この地域では新第三紀の堆積岩が存在することから(工藤ほか、2019)、モンモリロナイト等の、続成ないしは熱水変質作用をうけた変質鉱物が存在することにより低比抵抗になっていると解釈される。また、この深度あたりから十和田湖内の中湖を中心とした円形の低比抵抗域が現れるようになるが、深度400~500mで明確になる。この深度では御倉半島の付け根あたりにも低比抵抗域が見られるが、局所的で深度方向への広がりはない。一方、十和田湖の南東方向には高域の高比抵抗域が見られ、深くなるにつれてよりはっきりするようになる。規模が大きく、造山運動に伴うような深成岩体であろうと解釈される。

中湖では、水深150m付近で温泉水の湧出が推定されている(Nishimura et al., 1999)。また、最深部で熱水プルームの存在が示唆されている(Oikawa et al., 2015)。中湖の低比抵抗域はその断面を見ると、深部に向かって比抵抗値はやや大きくなるものの円柱状に伸びている(図2)。この円柱状の領域では地震の発生が少ない傾向にあり、地震が発生しづらい塑性領域であると考えられる(原子力規制庁、2023)。弾性から塑性への物性変化は370-400°Cなので(Fournier, 1999)、円柱状の低比抵抗領域はマグマからの脱ガス成分を含む高温の火山性流体の上昇域を示している可能性がある。ただし、震源との対応は明瞭ではなく、詳細な震源分布を把握した上での検討が必要であろう。

比抵抗構造に基づいた概念モデルから熱水系の数値シミュレーションを実施し、特徴的な低比抵抗構造が再現されるか試みた(原子力規制庁、2024)。その結果、低比抵抗を示す領域の透水性が周囲より十分に高ければ、深部より上昇してきた熱水がそこに滞留してNaCl濃度が高くなり、その領域が低比抵抗になることが確認された。

中湖を中心とした低比抵抗域を特徴づけるのは $20\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下の領域であるとみなし、その領域を抽出した(図3)。抽出された領域は、眺める方向によっては不完全であるが、概ねじょうご状の形をしている。その体積は約 $2.2\times 10^{10}\text{m}^3$ となった。一方、十和田カルデラは顕著な低重力異常を示すことで知られている(Yokoyama and Maki, 1964)。代表的な低重力カルデラの一つであり、その要因としてカルデラの陥没地形を充てんする未固結な火砕物が考えられている(横山、1969)。重力異常分布を面積分して得

られる質量欠損量は約  $10^{13}$  kg と見積もられている。密度差 0.3g/cc を仮定するとその体積は  $3.3 \times 10^{10} \text{m}^3$  となり、上で求めた低比抵抗域の体積とほぼ一致する。以上のことから、中湖を中心にした低比抵抗域の浅部は、高透水性で低密度であると考えられ、カルデラの陥没地形を充填した未固結の火砕物からなると解釈される。カルデラ形成にかかわった噴出物（八戸火砕流、八戸降下、雲井火砕流、大不動火砕流、切田テフラ、奥瀬火砕流）の岩石換算体積（DRE）は約  $4.6 \times 10^{10} \text{m}^3$  で（産業技術総合研究所地質調査総合センター（編）, 2025）、低比抵抗域の体積よりやや大きいオーダーとしては矛盾していない。

## 引用文献

- Fournier, R.O. (1999) Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic epithermal environment. *Econ. Geol.* 94 (8): 1193–1211. doi:10.2113 / gsecongeo. 94.8. 1193
- 原子力規制庁 (2023) 令和4年度原子力規制庁委託成果報告書 巨大噴火プロセス等の知見整備に係る研究（国立研究開発法人産業技術総合研究所令和5年3月）、  
<https://www.nra.go.jp/data/000447901.pdf>
- 原子力規制庁 (2024) 令和5年度原子力規制庁委託成果報告書 巨大噴火プロセス等の知見整備に係る研究（国立研究開発法人産業技術総合研究所令和6年3月）、  
<http://www.nra.go.jp/data/000473729.pdf>
- 工藤 崇・内野隆之・濱崎聡志 (2019) 十和田湖地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅). 産総研地質調査総合センター, 192p.
- Nishimura, R., Tsunogai, U., Ishibashi, J., Wakita, H. and Nojiri, Y. (1999) Origin of  $^{13}\text{C}$ -enriched methane in the crater lake Towada, Japan. *Geochemical Journal*, 33, 277-283.
- Oikawa, T., Kudo, T., Ishizuka, O. Sugimoto, Y. and Matsumoto, Y. (2015) Detailed morphology and structure of a caldera lake: Lake Towada (Towada Caldera), NE Japan Arc. Abstract, IAVCEI 2015.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター（編）(2025) 大規模噴火データベース, Version 1.0.20. 産総研地質調査総合センター. (<https://gbank.sj.jp/volcano/ledb/>)
- Yokoyama, I. and Maki, T. (1964) Preliminary report on a gravimetric survey on Towada caldera, Tohoku district, Japan. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, 2, 252-258.
- 横山 泉 (1969) カルデラの構造に関する考察. 火山 第2集, 14, 2, 77-83.

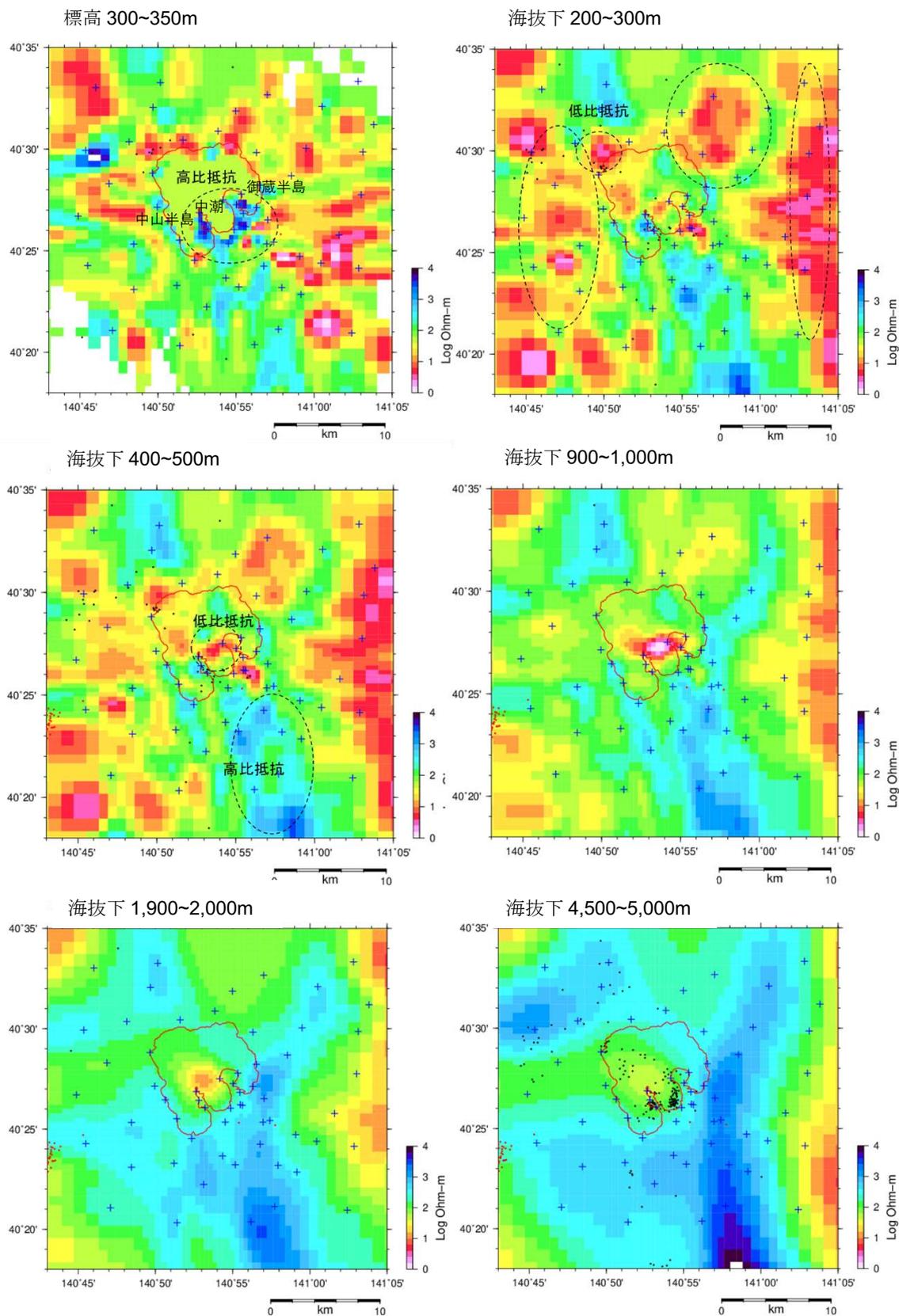


図1 深度ごとの比抵抗水平分布。赤い実線は十和田湖、+印は観測点を示す。

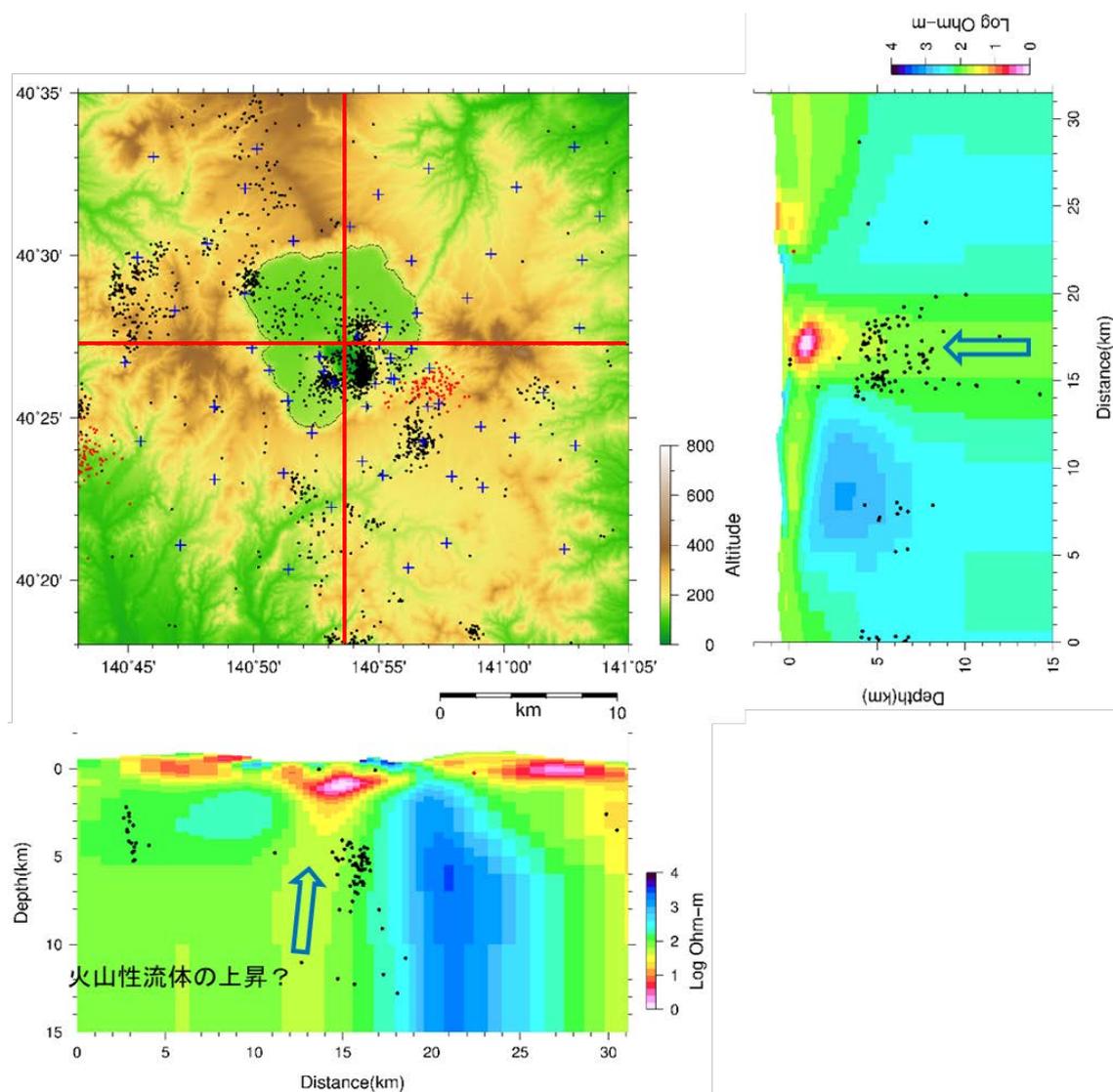


図2 十和田湖周辺の地形図（左上図）と赤線に沿った比抵抗構造の東西方向および南北方向の鉛直断面図（下図および右図）。地形図において、地震および低周波地震の震央（黒丸及び赤丸）を示す。各断面図において水平方向前後 1km の範囲内に発生している地震を投影し黒丸で示す。断面図の 0 km Depth は海水準。地形図の作成にあたっては、国土地理院発行の「数値地図 10mメッシュ」を使用した。

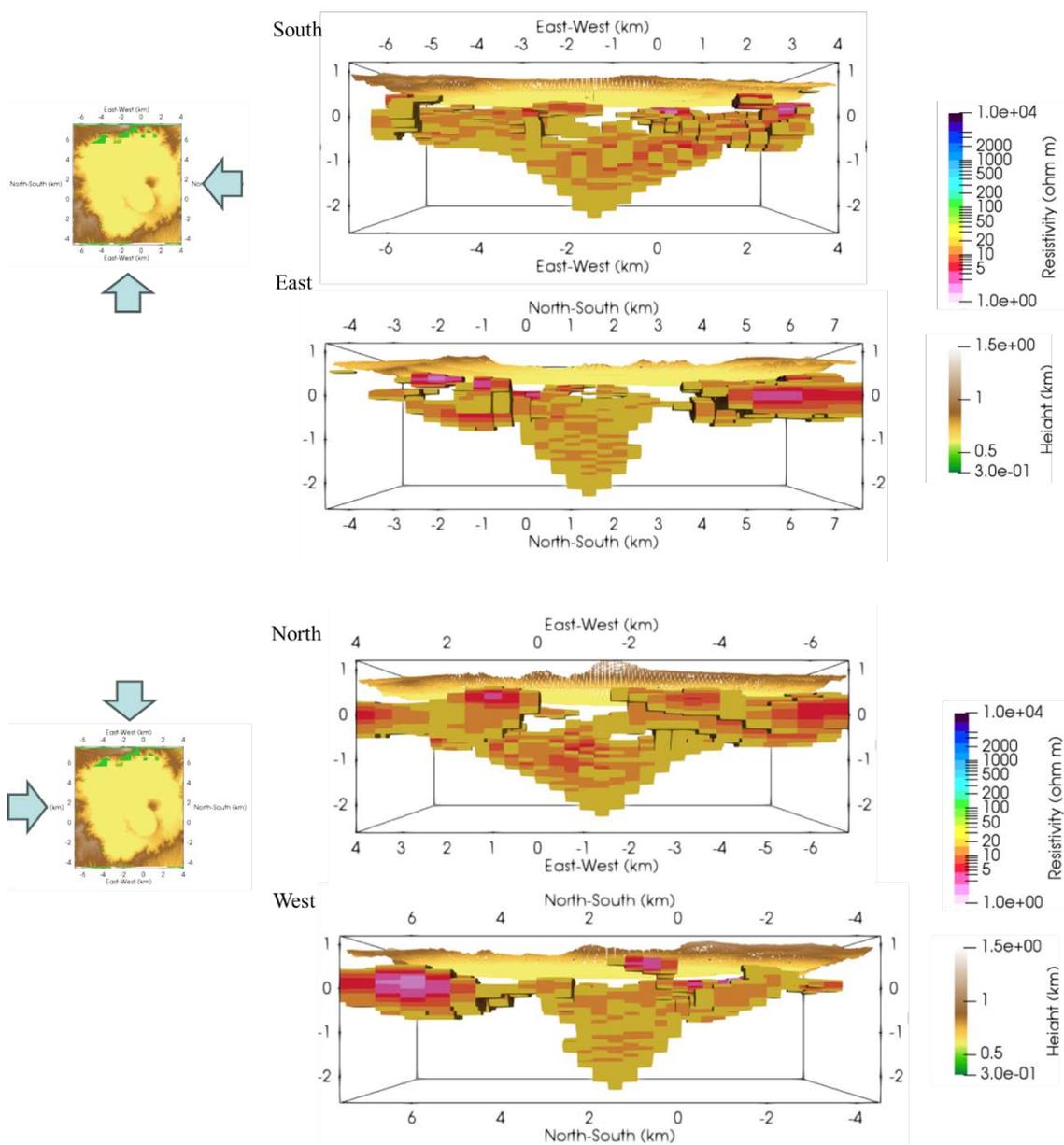


図3 低比抵抗域を特徴づける  $20 \Omega \cdot m$  以下の領域を抽出し、上図から、それぞれ南、東、北、西方向から眺めたもの。概ねじょうご状の形を示す。

## カルデラ形成期における十和田火山下のマグマ定置深度

## 概要

カルデラ形成期の十和田火山の噴出物を用いて高温高压相平衡実験を実施し、カルデラ形成噴火を引き起こしたマグマの定置深度を5~7 kmと推定した。その深度を、レシーバー関数により推定された現在の十和田火山下の地震波反射面の深度と比較したところ、両者が概ね一致することが分かった。過去に巨大噴火を起こしたマグマとほぼ同じ場所に、地震波速度の低下を引き起こす物質が存在すると示唆される。

原子力規制庁「巨大噴火プロセス等の知見整備に関わる研究」の一環として、2019~2021年に高温高压相平衡実験を実施し、カルデラ形成期の十和田火山下のマグマ定置深度を推定した。詳細は原子力規制庁報告書(2022)およびNakatani et al. (2022)にて報告済みである。ここではその概略について説明する。

十和田火山は、いまから3.6万年(エピソードN)と1.57万年前(エピソードL)にVEI6の火砕流噴火を起こしてカルデラを形成し、それぞれ大不動火砕流堆積物および八戸火砕流堆積物をもたらした。工藤ほか(2019)は十和田火山の地質情報を地質図にまとめ、カルデラ形成噴火の噴出物の分布域と化学組成などを明らかにした。本研究では、化学組成が明らかにされた両火砕流堆積物中の流紋岩質軽石を出発物質として、高温高压相平衡実験を実施することで、2つのカルデラ形成噴火が起こる直前のマグマ定置深度を推定することを目的とした。実験には産総研に設置された内熱式ガス圧装置(SMC-5000、図1)を用いた。水飽和条件で酸素分圧をNi-NiO(NNO)で緩衝したうえで、圧力100~350 MPa、温度825~900°Cの範囲で実験を実施した。実験の結果得られた相平衡図を図2に示す。元の軽石に含まれる主要な鉱物の晶出と結晶の割合等を最もよく説明する条件として、温度840~850°Cおよび圧力150~170 MPaが推定された(図2の濃い赤色の範囲)。軽石に含まれる鉱物の種類は、エピソードNの噴火では斜長石、直方輝石、単斜輝石、チタン鉄鉱、磁鉄鉱、エピソードLの噴火ではこれらの鉱物に加えて角閃石であったが、推定されたマグマ定置条件には二つの噴火で大きな差はなかった。マグマのわずかな化学組成の差が鉱物の安定性に影響を及ぼしていたと考えられる。

実験で推定されたマグマの平衡圧力は深さにしておよそ5~7 kmに相当する。つまり、過去二回のカルデラ形成噴火を起こしたマグマは、いずれも十和田火山下において、ほぼ同じ条件で定置していたと考えられる。また、現在の十和田火山の地下約6 kmにて、深さ方向に地震波速度(横波速度)が低下する反射面が確認されており(Chen et al., 2020)、その深さは本研究で推定した過去のマグマの定置深度と概ね一致する(図3)。この結果は、過去にカルデラ形成噴火を起こしたマグマとほぼ同じ場所に、マグマもしくは水流体など地震波速度の低下を引き起こす物質が存在することを示唆する。



図1 実験に使用した産総研の内熱式ガス圧装置。

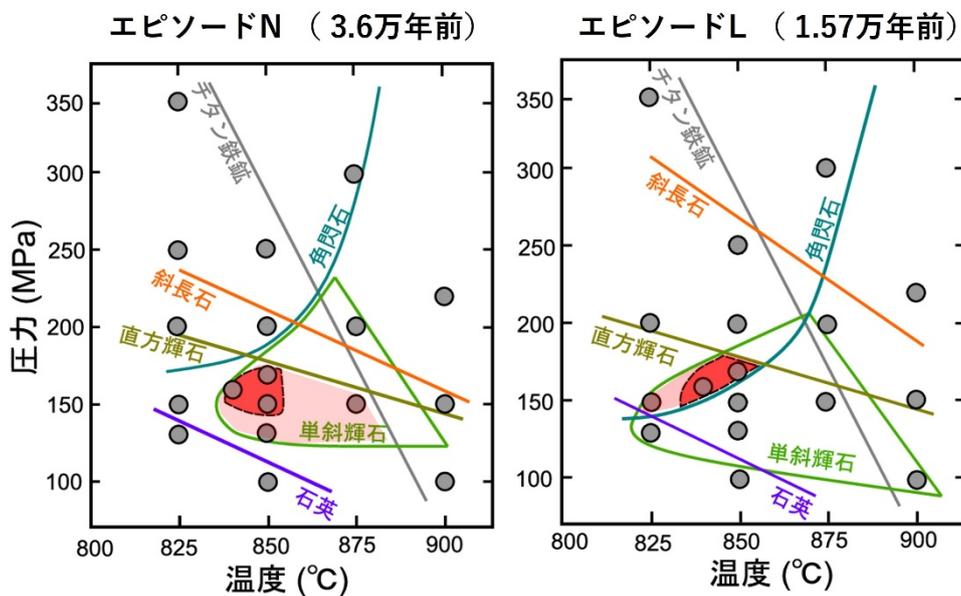


図2 エピソードNとエピソードLのカルデラ形成噴火を引き起こしたマグマの相平衡図。灰色の丸は、実験を行った温度圧力条件を示している。色つきの線は、実験結果から推定した鉱物の飽和曲線であり、鉱物名のラベルがついた側の温度圧力条件にて、当該鉱物がマグマ中で晶出する。薄い赤色で囲った領域は、軽石中に含まれる主要鉱物の組み合わせが再現される領域である。その中でも濃い赤色で囲った領域にて、結晶の割合などが最もよく再現され、この条件をマグマの定置条件と推定した。

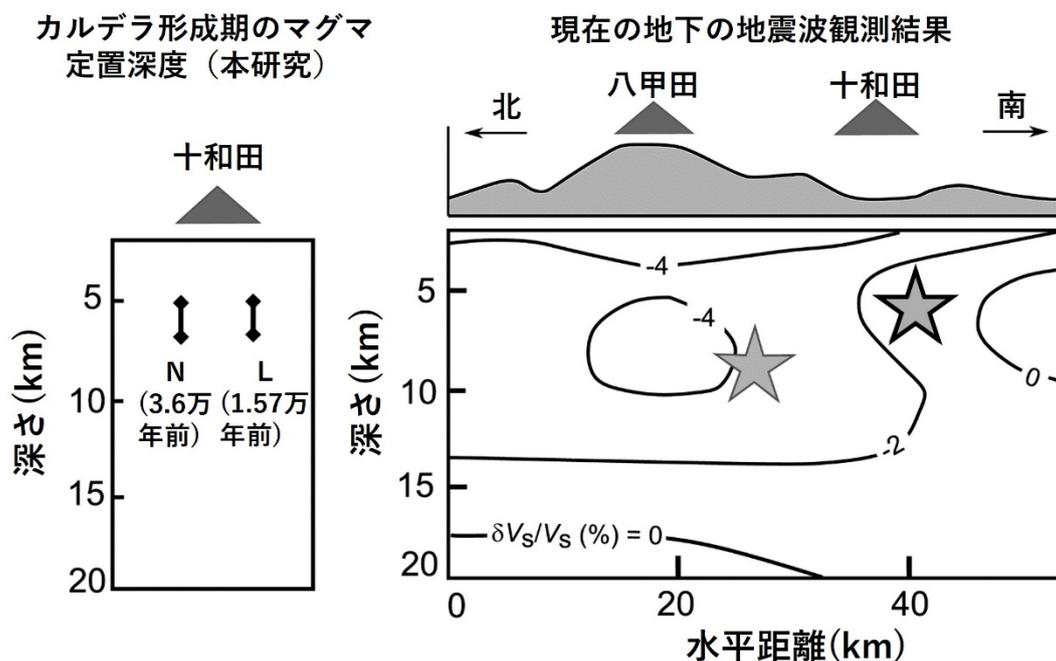


図3 高温高圧実験の結果から推定した二つのカルデラ形成噴火のマグマ定置深度（左図）と、現在の十和田火山下の地震波観測結果（右図）を比較した図。右図の等値線は常時微動を用いた地震波トモグラフィによる横波速度のパターベーションである（Chen et al., 2018）。また、星印はレーザー関数により推定された深さ方向に横波速度が遅くなる反射面の深度を表している（Chen et al., 2020）。

#### 引用文献

- Chen, K. X., Fischer, K. M., Hua, J. and Gung, Y. (2020) Imaging crustal melt beneath northeast Japan with Ps receiver functions. *Earth and Planetary Science Letters*, 537, 116173.
- Chen, K. X., Gung, Y., Kuo, B. Y. and Huang, T. Y. (2018) Crustal magmatism and deformation fabrics in northeast Japan revealed by ambient noise tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10), 8891-8906.
- 原子力規制庁（2022）令和3年度原子力規制庁委託成果報告書 巨大噴火プロセス等の知見整備に係る研究（国立研究開発法人産業技術総合研究所令和4年3月）、<https://www.nra.go.jp/data/000404676.pdf>
- 工藤 崇・内野隆之・濱崎聡志（2019）十和田湖地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）。産総研地質調査総合センター，p192.
- Nakatani, T., Kudo, T. and Suzuki, T. (2022) Experimental Constraints on Magma Storage Conditions of Two Caldera-Forming Eruptions at Towada Volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(5), e2021JB023665.

## 十和田火山の噴火履歴とマグマ組成の変遷

概略：十和田火山はデイサイト～流紋岩質マグマの爆発的噴火が卓越するカルデラ火山である。その噴火履歴はほぼ確立されており、マグマ噴出量積算階段図の精度も高い。カルデラを形成したVEI6噴火は約3.6万年前と約1.57万年前に起きている。カルデラ形成直後にマグマ供給系が更新されたが、その後、再びデイサイト～流紋岩質マグマによる爆発的な噴火が繰り返されるようになった。その頻度は、最近1万年間で6回であり、最新のマグマ噴火は平安時代の西暦915年に起きている。

本火山は、東北地方北部にある一辺が約11 kmのほぼ正方形をなすカルデラ火山である。このカルデラ（十和田カルデラ）の南東部には後カルデラ期に形成された小型のカルデラ（中湖火口）が位置しており、二重のカルデラ地形が特徴的である。最新の西暦915年噴火をエピソードA、約6万年前の奥瀬火砕流噴火をエピソードQとする噴火層序が、これまでに確立されている（Hayakawa, 1985；工藤, 2023；表1）。このうち、エピソードN（約3.6万年前）とL（約1.57万年前）の2回の火砕流噴火、すなわち大不動火砕流（17.9 DRE km<sup>3</sup>）と八戸火砕流（20.3 DRE km<sup>3</sup>）のデイサイト～流紋岩質マグマの噴出で十和田カルデラが形成された。後カルデラ期の火山活動はエピソードLの直後から高頻度で繰り返され、最近1万年間では6回の安山岩～流紋岩質のマグマ噴火が起きている。エピソードAの西暦915年噴火では、2.3 DRE km<sup>3</sup>のデイサイト～流紋岩質マグマが中湖火口から噴出し、エピソードの末期に噴出した毛馬内火砕流は火口から20 km前後の距離に到達している。

マグマ噴出量階段図では、十和田カルデラを形成したエピソードL以降の高いマグマ噴出率とは対照的に、エピソードL-N間とエピソードN大不動火砕流噴火直前のマグマ噴出率は低調である（図1）。すなわち、VEI6クラスの巨大噴火の前には、明瞭な噴火活動の低下が確認できる。また、本カルデラ噴出物化学組成の時間変化をみると、エピソードQとPの間で大きな変動があり、Zr/Th比の低下やSr同位体比の上昇が顕著である（図2）。これはマグマ供給系の変化により地殻由来のデイサイト～流紋岩質マグマに富むようになったことを意味している（Yamamoto et al., 2018）。特に高いSr同位体比は、マントル由来物質だけでは説明不可能である。その一方で、エピソードNに向けマグマ噴出率が低下したことは、地殻由来マグマが地下に蓄積し続けたことを意味している。また、エピソードL直後に化学組成の急激な変化が認められ、Zr/Th比の上昇やSr同位体比の低下が起きている。これはエピソードLで地殻由来デイサイト～流紋岩質マグマ溜まりが空になり、後カルデラ期の最初にマグマ供給系が一旦リセットされ、苦鉄質マグマの噴出が卓越したことを意味している。その後、再びZr/Th比の低下やSr同位体比の上昇が始まって近年の噴火へと至っているが、これはエピソードL・Nとは異なる地殻由来マグマの生成が再び始まったことを意味している。この傾向は最新のエピソードAでも同じであり、今後も地殻由来デイサイト～流紋岩質マグマの活動が継続するものと考えられる。

活動期	噴火エピソード (Hayakawa, 1985)	噴出物	マグマ種類	噴火様式	年代 (ka)	年代値	引用	体積 (DRE km <sup>3</sup> )	VEI	引用
後カルデラ 成層火山・ 溶岩ドーム (後カルデラ 期)	A	十和田Aテフラ			1.04	AD915	*1	<b>2.3</b>	<b>5</b>	*8
		毛馬内火砕流	流紋岩～ デイサイト	火砕流		1090±100yBP	*1	1.8		
		大湯3軽石	—	降下軽石		1470±100yBP	*1	0.04		
		大湯2火山灰	—	降下火山灰, 火砕サージ		1280±90yBP	*2	0.21		
		大湯1軽石	流紋岩	降下軽石				0.21		
	B	十和田Bテフラ			2.7	2550±20yBP	*3	<b>0.4</b>	<b>5</b>	*8
		惣部火山灰 迷ヶ平軽石	流紋岩 流紋岩	降下火山灰 降下軽石		3000yBP	*1	0.32 0.04		
	C	十和田Cテフラ			5.9	5390±140yBP	*1	<b>2.5</b>	<b>5</b>	*8
		宇樽部火山灰	デイサイト	火砕サージ, 降下火山灰		3920±140~	*2	0.59		
		金ヶ沢軽石	デイサイト	降下軽石		6550±170yBP		0.32		
	D'	御倉山溶岩 十和田D'テフラ 戸来火山灰	デイサイト	溶岩ドーム形成 マグマ水蒸気噴火: 降下火山灰	7.5	6670±25yBP	*3	<b>0.32</b>	<b>4</b>	*8
						6000yBP	*1			
	D	十和田Dテフラ			8.2	6830±25yBP	*3	<b>0.16</b>	<b>4</b>	*8
		小国軽石	デイサイト	降下軽石, 降下火山灰		7420±25yBP 7000yBP	*3 *1			
	E	十和田Eテフラ			9.2	8370±170yBP		<b>0.5</b>	<b>5</b>	*8
貝守火山灰 南部軽石		デイサイト	降下火山灰 ブリニー式噴火: 降下軽石	8600±250yBP 8110±30yBP		*4	0.15 0.39			
F	十和田Fテフラ			10.2	8110±30yBP		<b>0.4</b>	<b>4</b>	*8	
	椀山火山灰 夏坂スコリア	安山岩 安山岩	降下火山灰, スコリア 降下スコリア		10,500yBP 10.2cal ka	*4	0.14 0.23			
G	十和田Fテフラ 新郷軽石	デイサイト	降下軽石	11	9330±35yBP 9970±35yBP	*4	<b>0.1</b>	<b>4</b>	*8	
H-K	二の倉テフラ群 中山崎溶岩	玄武岩質 安山岩	降下スコリア, 降下火山灰 溶岩流	11.7~15.7		*1	<b>4.42</b>		*8	
十和田 カルデラ (カルデラ 形成期)	L	十和田Lテフラ	デイサイト	水蒸気ブリニー式噴火: 火砕流, 降下火山灰, 軽石	15.7	13,000yBP	*1	<b>20</b>	<b>6</b>	*8
		八戸火砕流	～流紋岩			12,700±260yBP	*2	16		
		十和田八戸 (HP)						4.3		
	M	雲井火砕流と関連テフラ	流紋岩	降下軽石, 降下火山灰	21	17,730±70yBP 17,390±60yBP	*5 *7	<b>2.86</b>	<b>5</b>	*8
	N	十和田Nテフラ			36	31,936±210yBP	*9	<b>17.9</b>	<b>6</b>	*8
		大不動火砕流 十和田切田 (KR) : ビスケット1 (BP1)	流紋岩	火砕流, 降下軽石, 降下火山灰		25,850±1360yBP	*2	16 1.9		
	O	十和田合同 (GP)	流紋岩	降下軽石, 降下火山灰	54		*8	<b>1.1</b>	<b>5</b>	*8
P'	T-25テフラ		マグマ水蒸気噴火: 降下火山灰	55		*8	<b>0.18</b>	<b>4</b>	*8	
P	十和田キビダゴ (KB)	—	降下軽石, 降下火山岩片	58		*6	<b>0.84</b>	<b>5</b>	*8	
Q	奥瀬火砕流, 十和田レッドパミス (RP)	安山岩	スコリア流, 降下スコリア, 降下軽石	61		*6	<b>5.58</b>	<b>6</b>	*8	

引用文献

- \*1 : Hayakawa, Y. (1985): Pyroclastic geology of Towada Volcano. Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, 60, 507-592.
- \*2 : 中川久夫, 中馬教允, 石田琢二, 松山 力, 七崎 修, 生出慶司, 大池昭二, 高橋 一 (1972) : 東北大学理学部地質学古生物學教室研究邦文報告. 73, 7-18.
- \*3 : 工藤 崇, 佐々木 寿 (2007) : 十和田火山後カルデラ期噴出物の高精度噴火史編年. 地学雑誌, 116, 653-663.
- \*4 : 工藤 崇 (2008) : 十和田火山, 噴火エピソードE及びG噴出物の放射性炭素年代. 火山, 53, 193-199.
- \*5 : 工藤 崇, 小林 淳 (2013) : 十和田火山, 先カルデラ期～カルデラ形成期テフラの放射年代測定. 地質調査所研究報告, 64, 305-311.
- \*6 : Ito, K., Tamura, T., Kudo, T., Tsukamoto, S. (2017) Optically stimulated luminescence dating of Late Pleistocene tephric loess intercalated with Towada tephra layers in northeastern Japan. Quaternary International 456, 154-162.
- \*7 : 工藤 崇 (2022) 十和田火山, 噴火エピソードMの噴出物層序と噴火推移. 地質学雑誌, 128, 109-127.
- \*8 : 工藤 崇 (2023) 十和田火山の積算マグマ噴出量階段図. 地質調査研究報告, 74, 133-153.
- \*9 : 小岩直人・芝 正敏・葛西優貴 (2007) 青森県屏風山砂丘地帯, 館岡層中の十和田大不動テフラのAMS14C年代. 第四紀研究, 46, 437-441.

表1 十和田カルデラの噴火履歴

後カルデラ期の御門石溶岩は、年代未確定のため除いている。ka = 千年前; yBP = 年前 (1950年基点)。

十和田

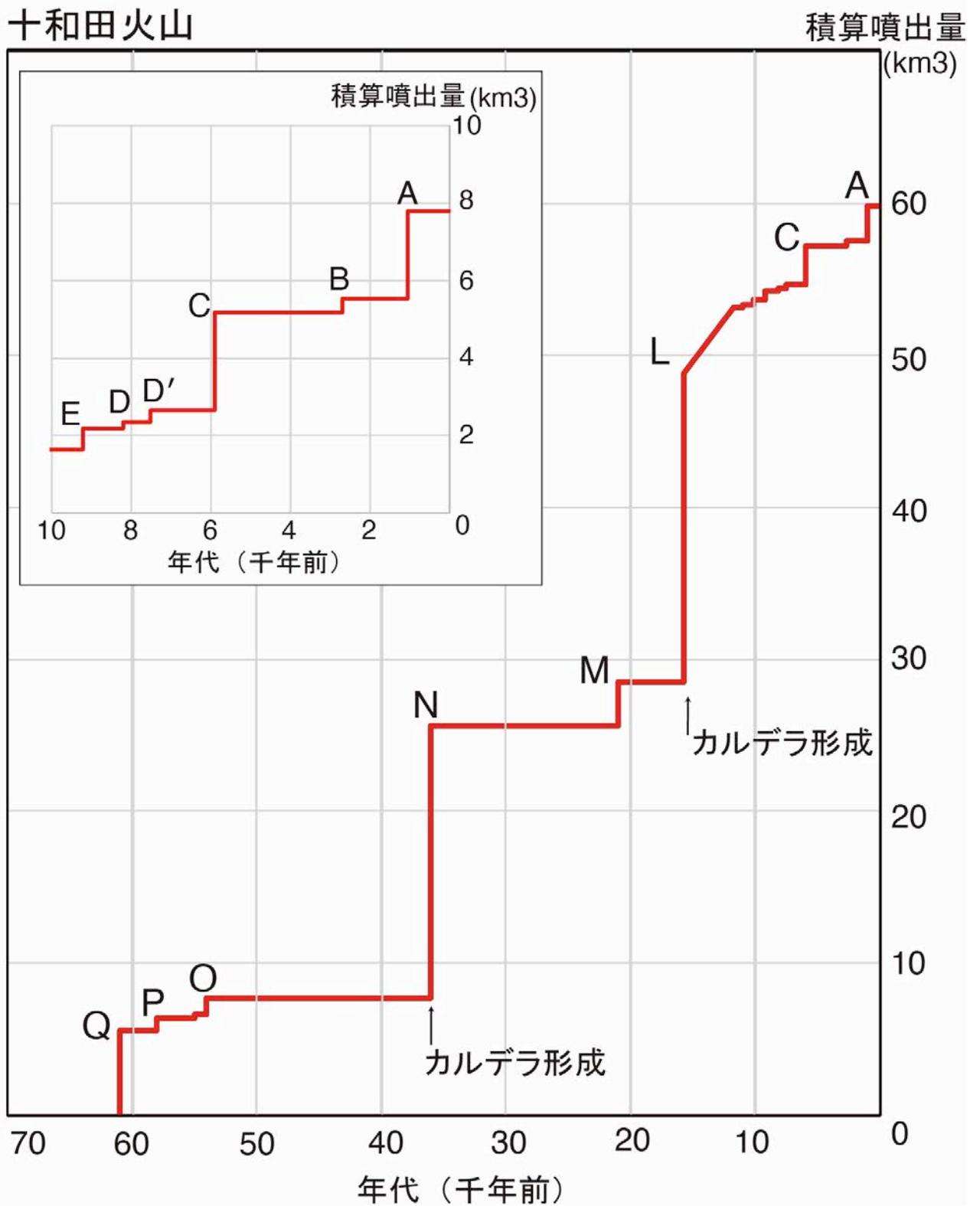


図1 十和田火山の噴出量時間積算図

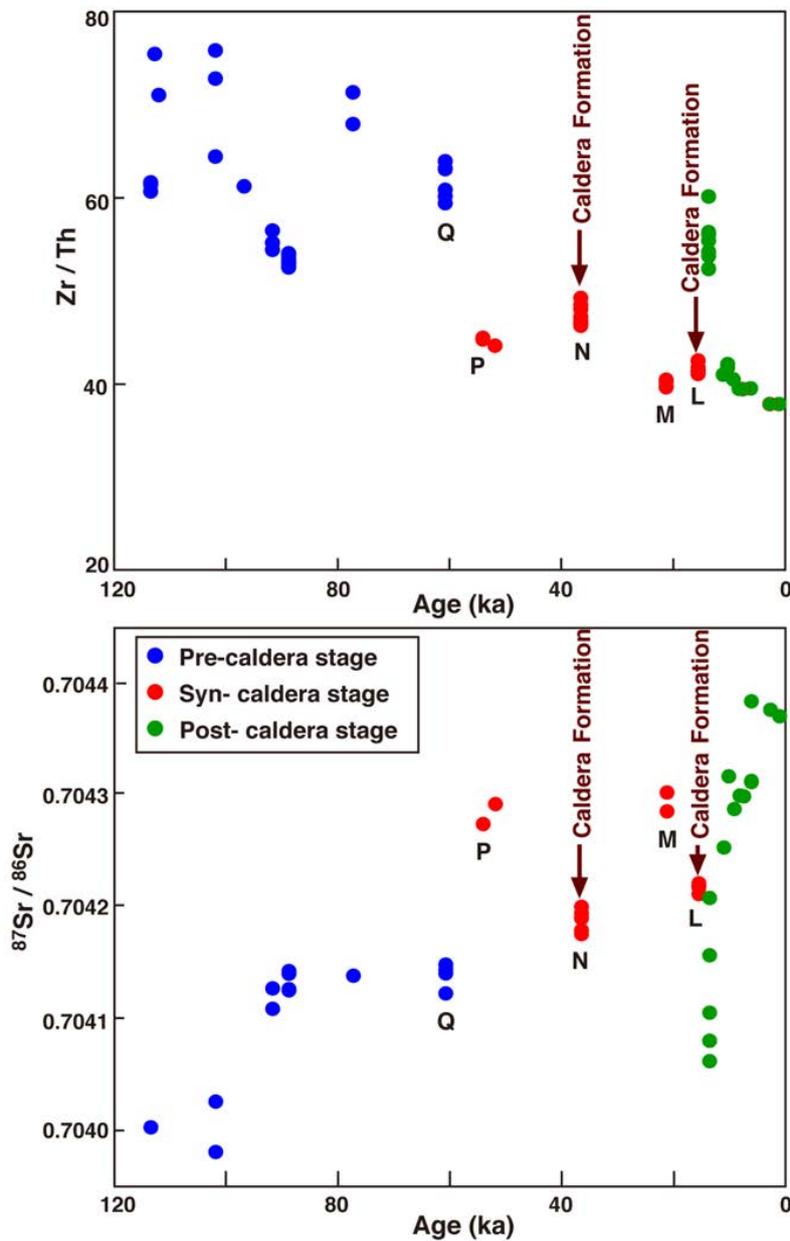


図3 十和田火山噴出物の全岩化学組成の時間変化。

ka は千年前。カルデラ形成噴火 N に先行して、噴火エピソード P から噴出物の化学組成が大きく変化している。また、カルデラ形成噴火 L 直後のも噴出物化学組成の大きな変化があり、L マグマ溜まりは空になったと考えられる (Yamamoto et al., 2018)。

引用文献

Hayakawa, Y. (1985) Pyroclastic Geology of Towada Volcano. 東京大学地震研究所彙報 60, 507-592.  
 工藤 崇 (2023) 十和田火山の積算マグマ噴出量階段図. 地質調査研究報告, 74, 133-153.  
 Yamamoto, T., Kudo, T. and Ishizuka, O. (2018) Temporal variations in volumetric magma eruption rates of Quaternary volcanoes in Japan. *Earth, Planets and Space*, 70. Doi: 10.1186/s40623-018-0849-x

＊十和田湖の地殻熱流量について

筆者は、ドイツ国ヘルムホルツ環境研究所の主任研究員・B ベーラー博士との共同研究として、2005～2007年に全国の代表的なカルデラ湖の熱循環に関する研究を行った。観測方法は、各湖の最深点で高精度の水質プロファイラーを投下し、0.1 m 深ピッチで水温・25°C電気伝導度(EC25)・溶存酸素(DO)の鉛直分布を得るものである。

この一環として、2007年の7月と11月上旬に十和田湖の最深点(水深 326 m : 図1の赤丸)で実施した観測結果を図2に示す。この時期は湖水が密度的に安定した成層状態にあり、湖面での熱収支の影響が下層(約40 m以深)には影響しない時期と考えられている。

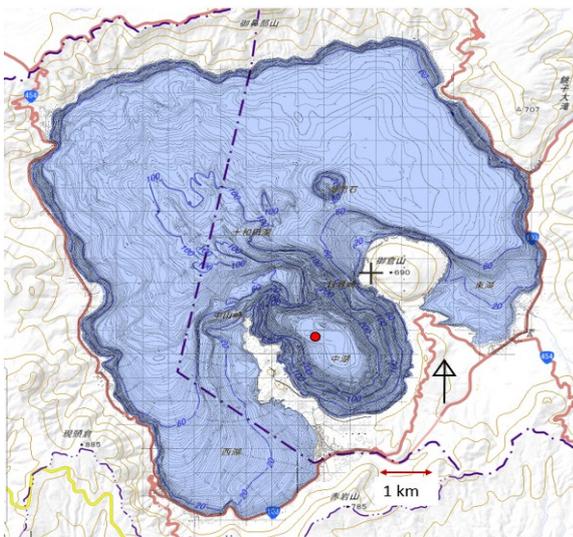


図1. 十和田湖の湖沼図と周辺地形(国土地理院 URL より) 赤丸は最深点の位置.

湖の地殻熱流量を評価する場合、重要なのは上限境界をどこに設定するか、ということである。図2の分布から、約90 m 深と約160 m 深(図の赤い破線)に水温と EC25 の分布傾向が変わる境界がある。

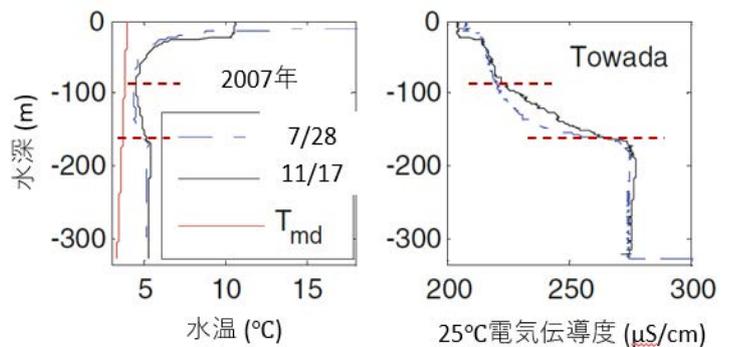


図2. 十和田湖最深点における水温(左)と 25°C電気伝導度(右)の鉛直分布. T<sub>md</sub>は圧力を考慮した最大密度を与える水温(Boehrer et al., 2013 の Fig. 2 を改変). 赤い破線は境界線の位置.

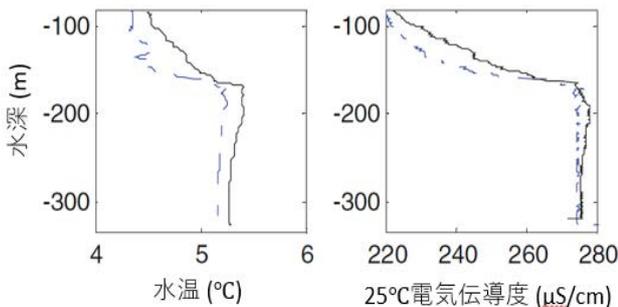


図3. 十和田湖最深点における水温(左)と 25°C電気伝導度(右)の鉛直分布(図2の水深90m以上を拡大)(Boehrer et al., 2013 の Fig. 2 を改変).

ここでは、90 m 以深で水温・EC25 が共に増加することから、この水深を地殻熱流が及ぶ上限とした。その理由は、11月は湖にとって既に冷却期にあり、7月に比べ水温と EC25 を共に上昇させる外的要因は湖底内部以外には考えられないからである。結果として、図3の水温上昇分 0.2°C～0.4°C を考慮した単位面積当たりの貯熱量の変化を計算し、18.6 W/m<sup>2</sup>を得た。なお、この場合、水温については水平多層構造を仮定し、湖底は一様に平坦面

であるとして計算している。この地殻熱流量は、支笏湖 0.29 W/m<sup>2</sup>、田沢湖 0.27 W/m<sup>2</sup> に比べかなり大きく、EC25 も増加することから最深点の湖底下熱源が移流として十和田湖深層の水質に影響していることを示唆する。

なお、最近の情報として、秋田大・網田和宏氏が2022年5月25日、7月28日、10月20日に計測した最深点での水温分布では、地殻熱流の上限境界は水温極小値の位置から水深約110 m と判断

された(図4の破線)。今回は、図1の湖沼図で得た湖盆体積を考慮して各期間の110m以深の貯熱量変化を求め、これを水深110mの水平面積で除して地殻熱流量(W/m<sup>2</sup>)とした。なお、今回も水温の水平多層構造を仮定した。結果として5月25日～7月28日間で11.1 W/m<sup>2</sup>、7月28日～10月20日間で10.8 W/m<sup>2</sup>と見積もられ、比較的安定した値が得られた。

今回得られた地殻熱流量が、どのように時間変動するのか。これを知るには、今後、最深点に複数台のロガーを固定した係留系を設置し、水温・電気伝導度の連続測定をする必要がある。

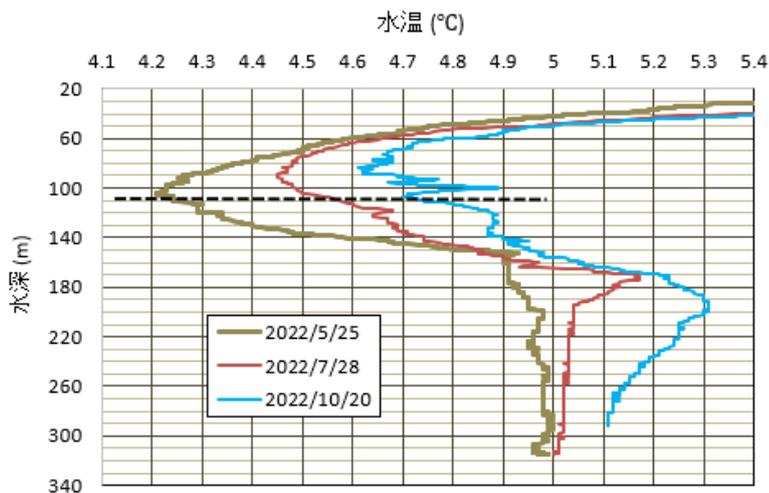


図4. 2022年成層期の水温分布。横軸の水温は拡大して表示。点線は想定した上限境界の位置。

十和田周辺の地震活動

【概要】

- ・ 十和田周辺では、中湖及びその周辺を中心とする地震活動がみられる。1971年～1998年の期間においては、一時的な活発化や数年単位での活発化もみられた。
- ・ 中湖付近では、深さ約15 km以浅の地震と深さ約25 km以深の深部低周波地震が発生しているが、浅部の地震活動領域においても低周波成分が卓越する低周波地震が散発的にみられる。

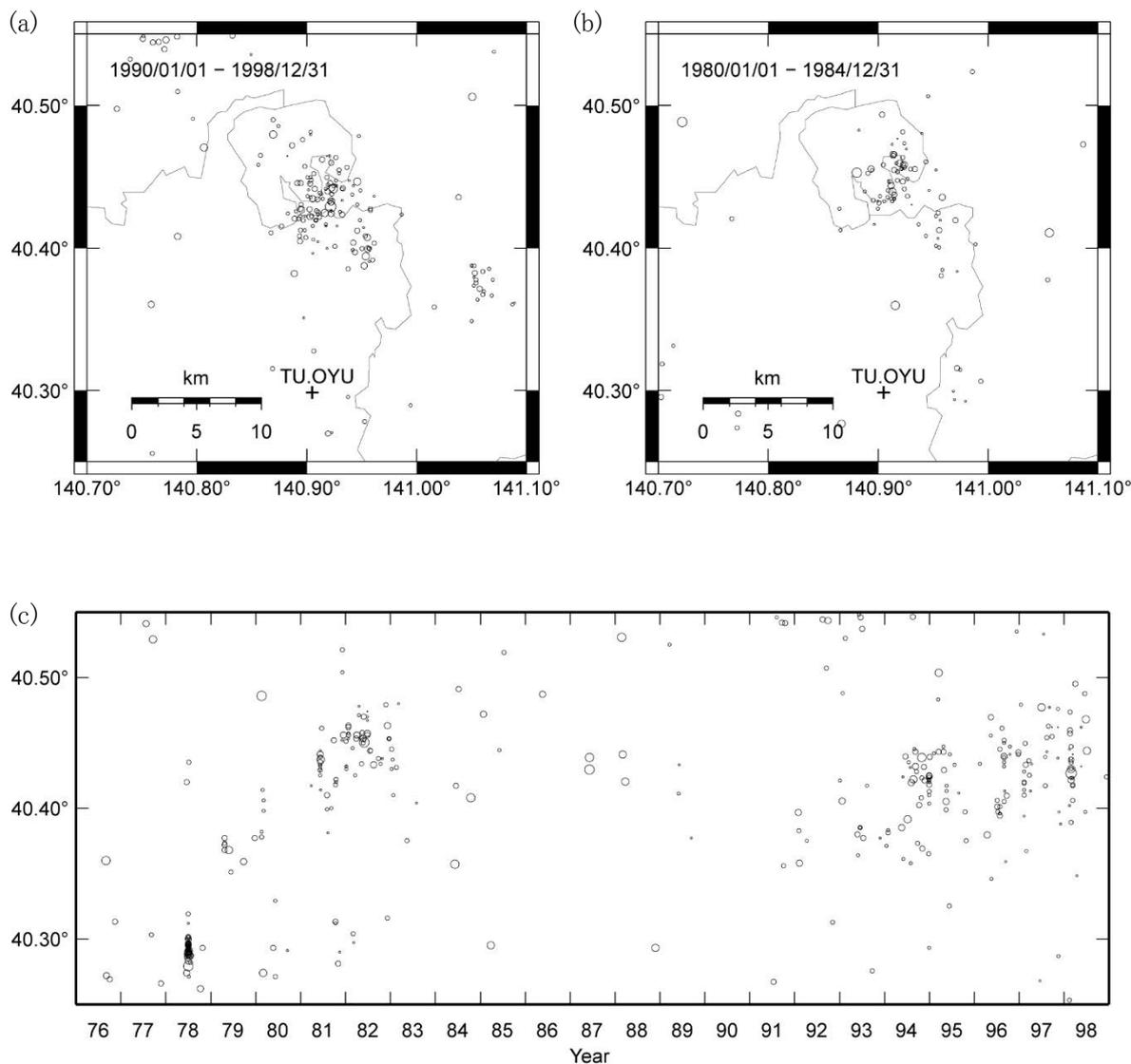


図1. 十和田周辺の地震活動（東北大学のルーチン処理による1971年～1998年の活動推移）：

(a), (b)は、それぞれ1990年～1998年と1980年～1984年の期間についての震源深さ20 km以浅の地震の震央分布。東北大学の地震観測網と火山観測網を使用した震源決定結果であり、図中のTU.OYUは広域火山観測網の大湯観測点（1987年12月観測開始）を表す。(c)1976年～1998年の期間における地震活動推移。(a), (b)に表示した範囲内の地震についての震源緯度の時系列を表す。

1995年1月に群発的な地震活動があったほか、数年単位の活動の活発化もみられる（東北大学，1995）。

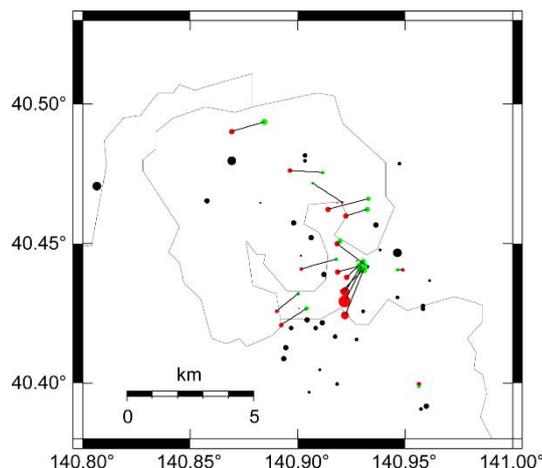


図2. 東北大学のルーチン処理による震源と気象庁一元化震源の対応：

1997年、1998年に十和田周辺の深さ20 km以浅で発生した地震のうち、気象庁一元化震源に記載のある地震の震央を緑丸で、その各地震に対する東北大学のルーチン処理結果の震央を赤丸で示す。黒線で示した両者の震央位置の差は概ね2 km以下である。黒丸は東北大学のルーチン処理で震源が決められた地震のうち一元化震源に記載のないものの震央を表す。

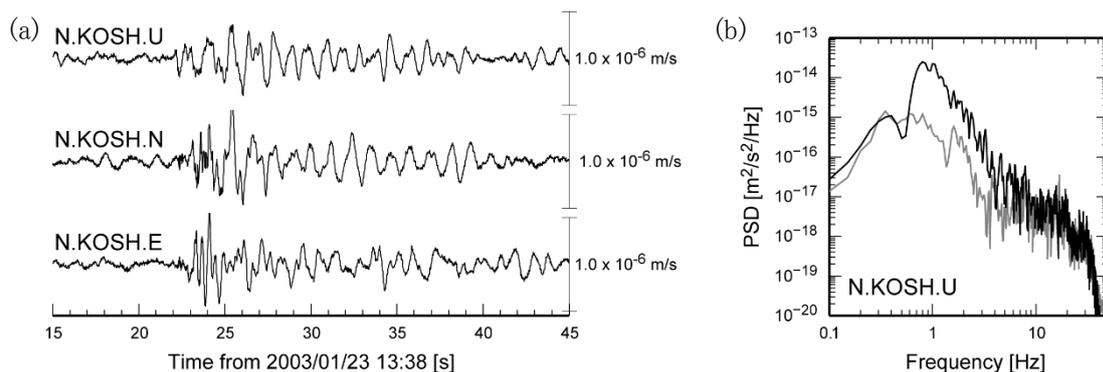


図3. 中湖付近の浅部低周波地震の例（2003年1月23日13時38分）：

(a) 防災科学技術研究所・高感度地震観測網（Hi-net）の小坂観測点（N.KOSH）における3成分速度波形。(b) 上下動成分のスペクトル。黒線と灰線は、それぞれ(a)の20～40秒の時間窓、ノイズ部分のパワースペクトル密度を表す。

十和田付近の浅部（深さ約10 km以浅）においては、低周波成分が卓越した地震が散発的に発生している。2001年11月、12月には浅部低周波地震の群発的な活動も報告されている（弘前大学，2002）。

引用文献

- ・東北大学（1995）1995年1月十和田カルデラに発生した群発地震について，火山噴火予知連絡会会報（第61号）。
- ・弘前大学（2002）第91回火山噴火予知連絡会資料。

本資料は、東北大学と防災科学技術研究所のデータを利用して作成した。

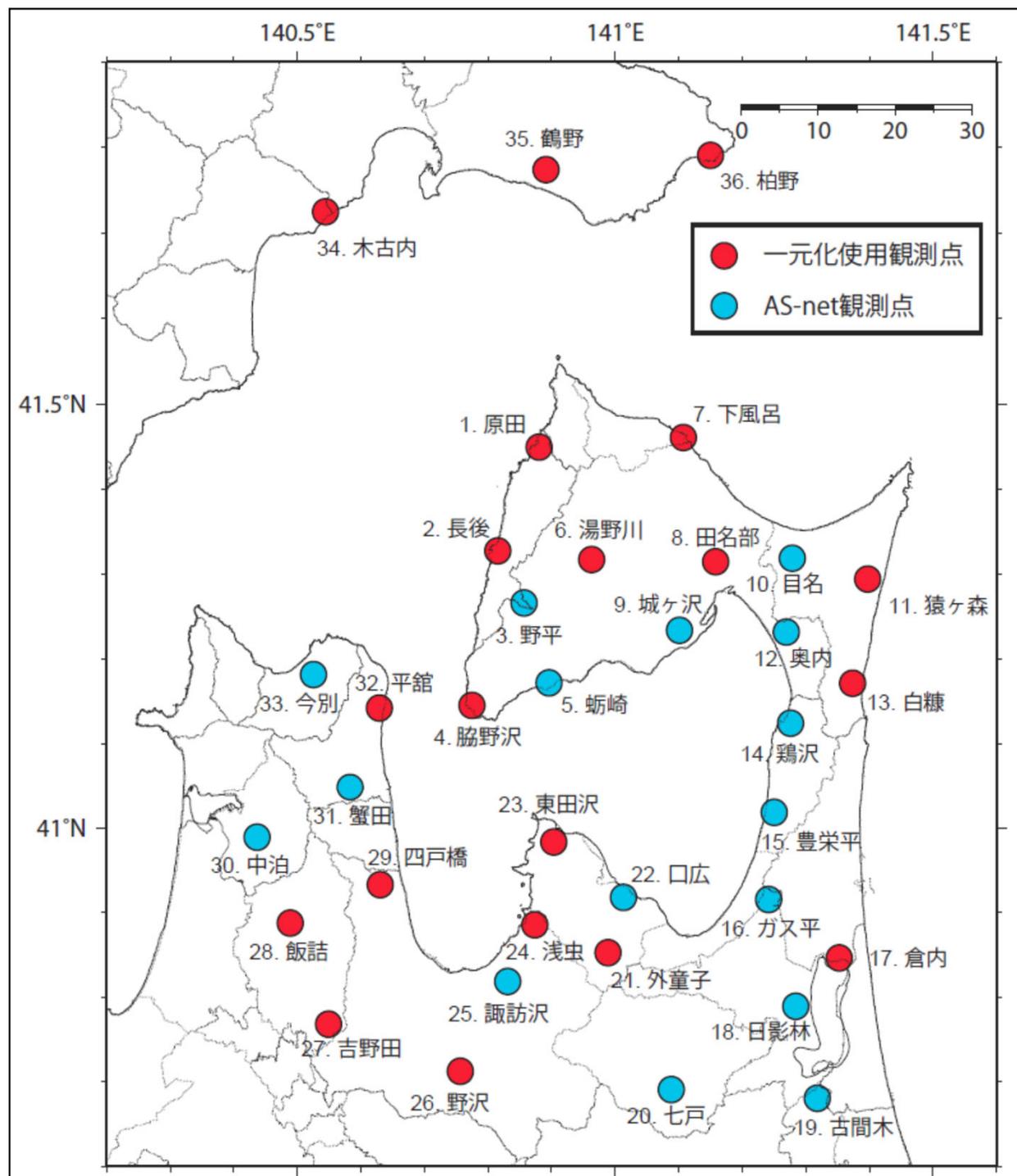
# AS-netによる 十和田湖付近の地震活動と 青森周辺のメカニズム解

2026.1.30.

地震予知総合研究振興会

# 地域微小地震観測網 AS-net

- 2013-2014年に36点設置
- 地下約20 mの地中センサー（高感度速度計+強震計）のみ
- JDX-netへリアルタイムデータ流通
- Hi-netホームページから波形データダウンロード可能
- 2017年12月より20点が気象庁一元化震源決定に利用される



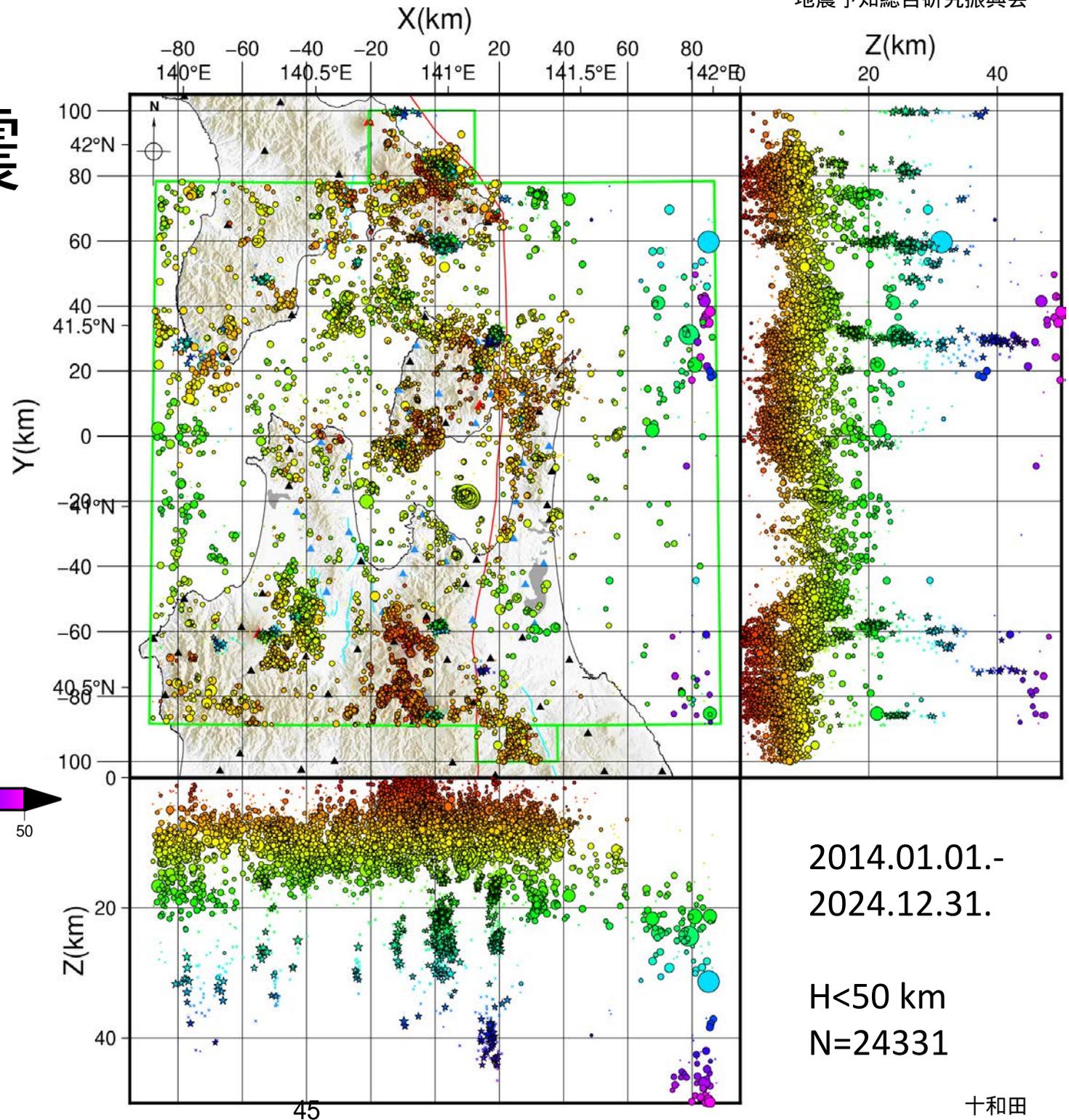
## AS-net手動震源

	H<50 km	H>50 km	低周波（内数）
2014	2223	573	97
2015	1832	567	108
2016	3393	601	107
2017	2177	651	100
2018	1864	638	108
2019	1755	749	123
2020	1804	644	98
2021	1640	642	106
2022	2348	641	129
2023	2088	654	87
2024	3210	655	95
合計	24331	7015	1158

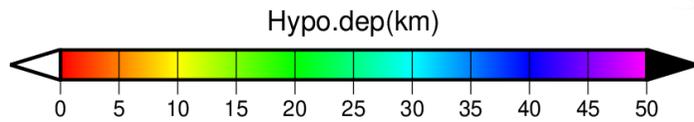
# 地震活動

2014.01.01. ~ 2024.12.31.

# 地殻内地震



- ▲ AS-net
- ▲ Other stations
- Active fault
- Volcanic front
- ▲ Quaternary Volcano

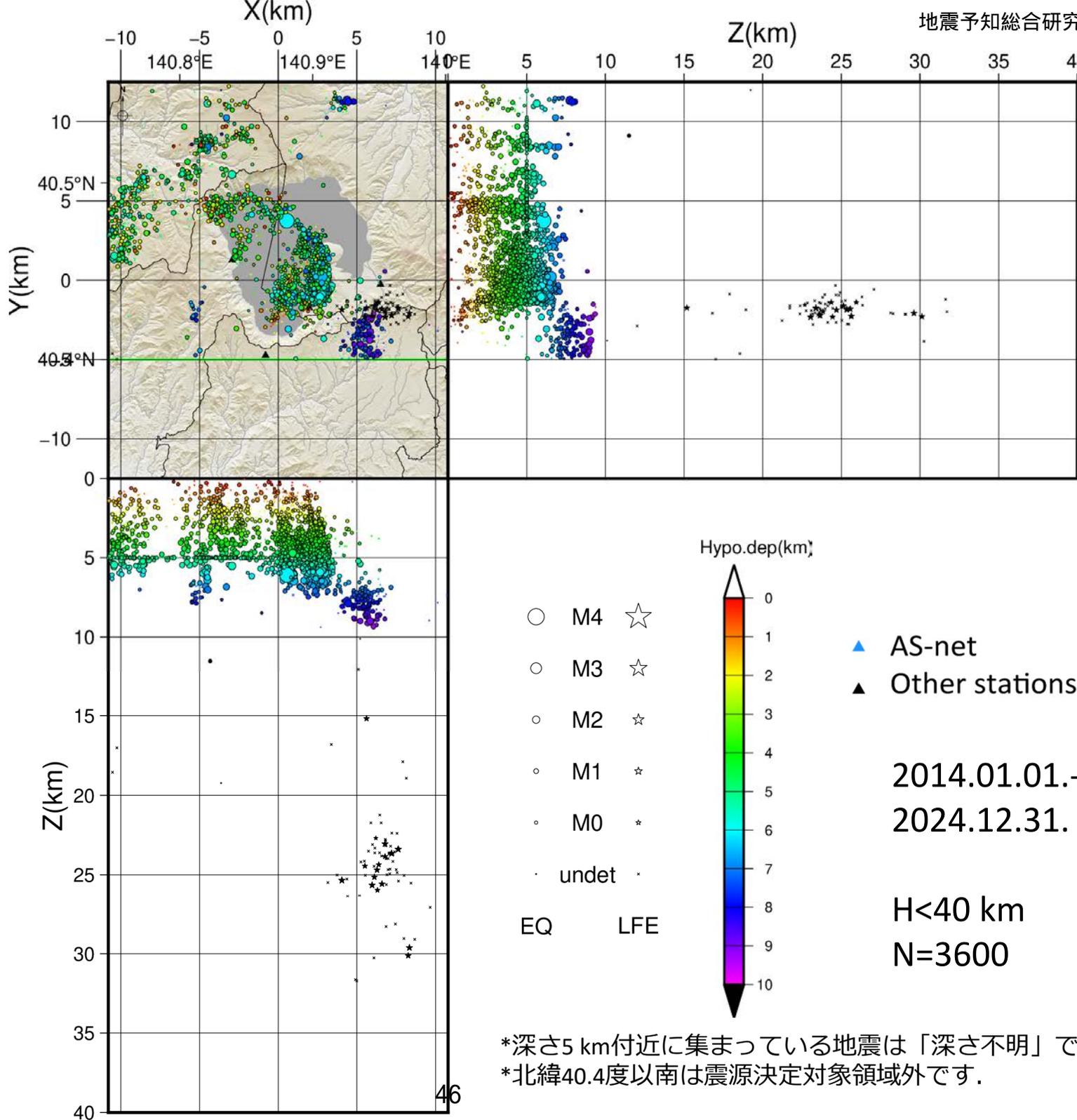


- LFE · \* ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆
- undet M0 M1 M2 M3 M4 M5
- EQ · ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○

2014.01.01.-  
2024.12.31.

H<50 km  
N=24331

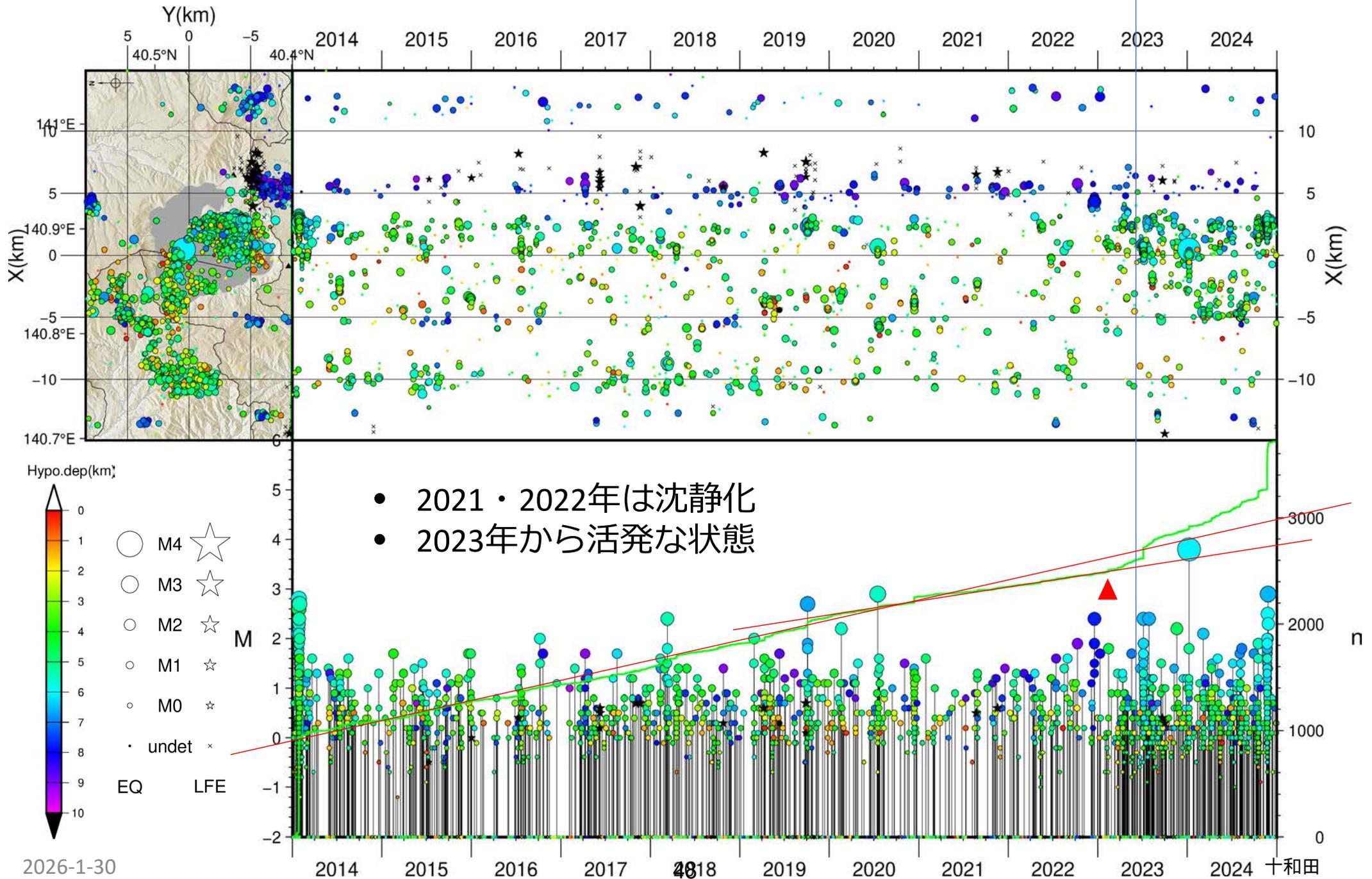
# 地殻内地震 十和田湖付近



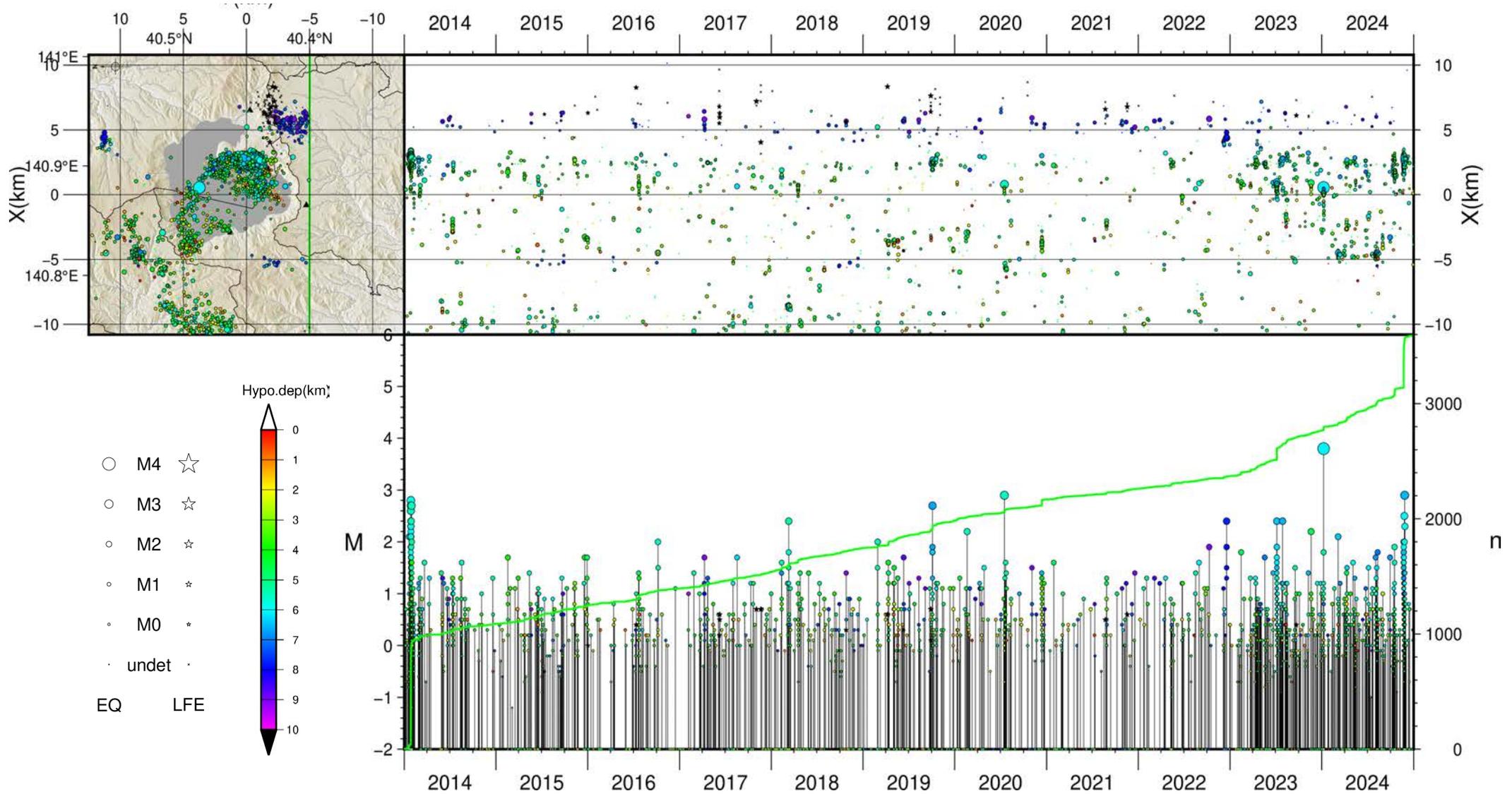
# 十和田の地震

# 十和田湖の地震 (2014-2024年)

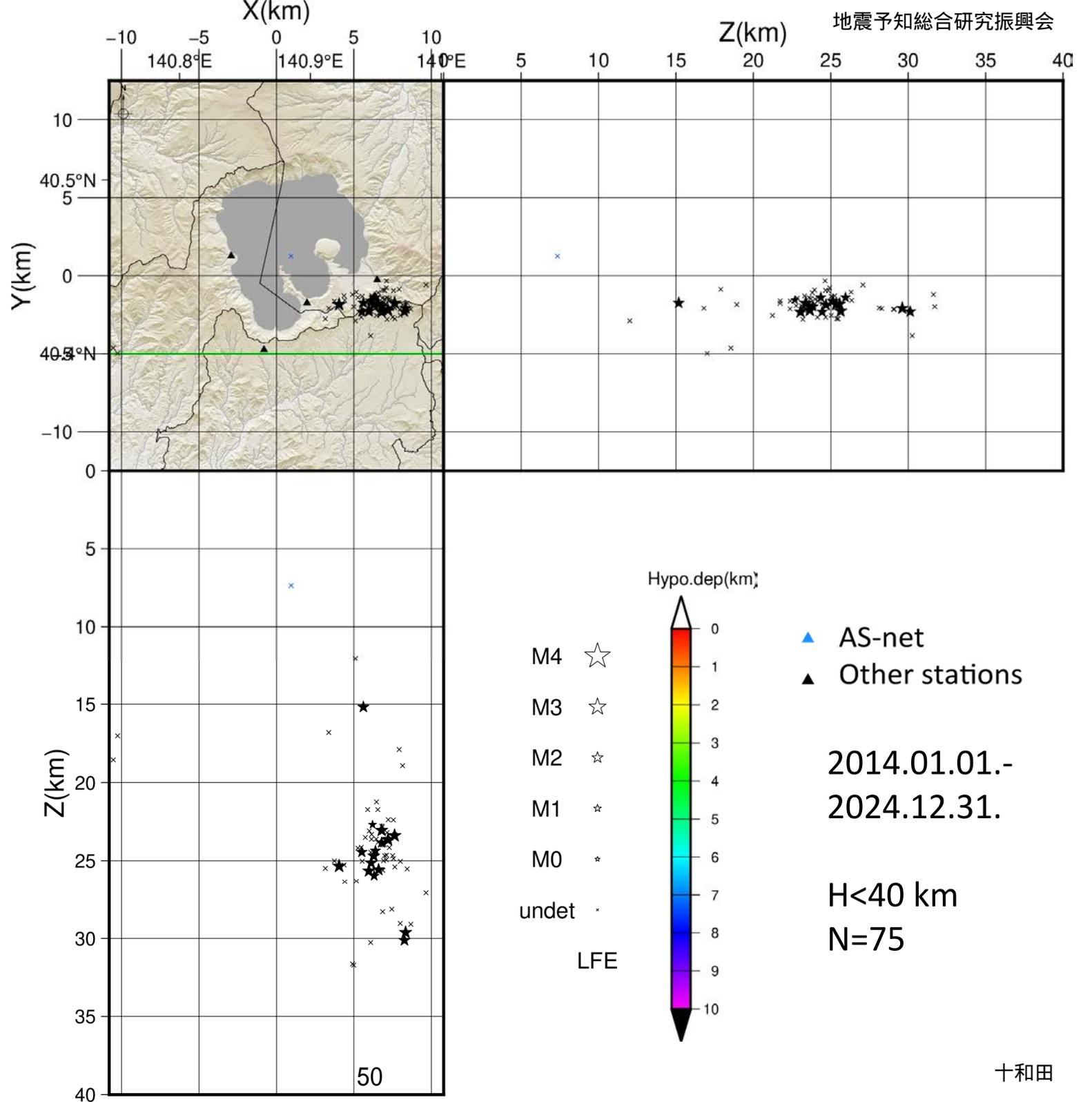
読み取り点  
2点追加



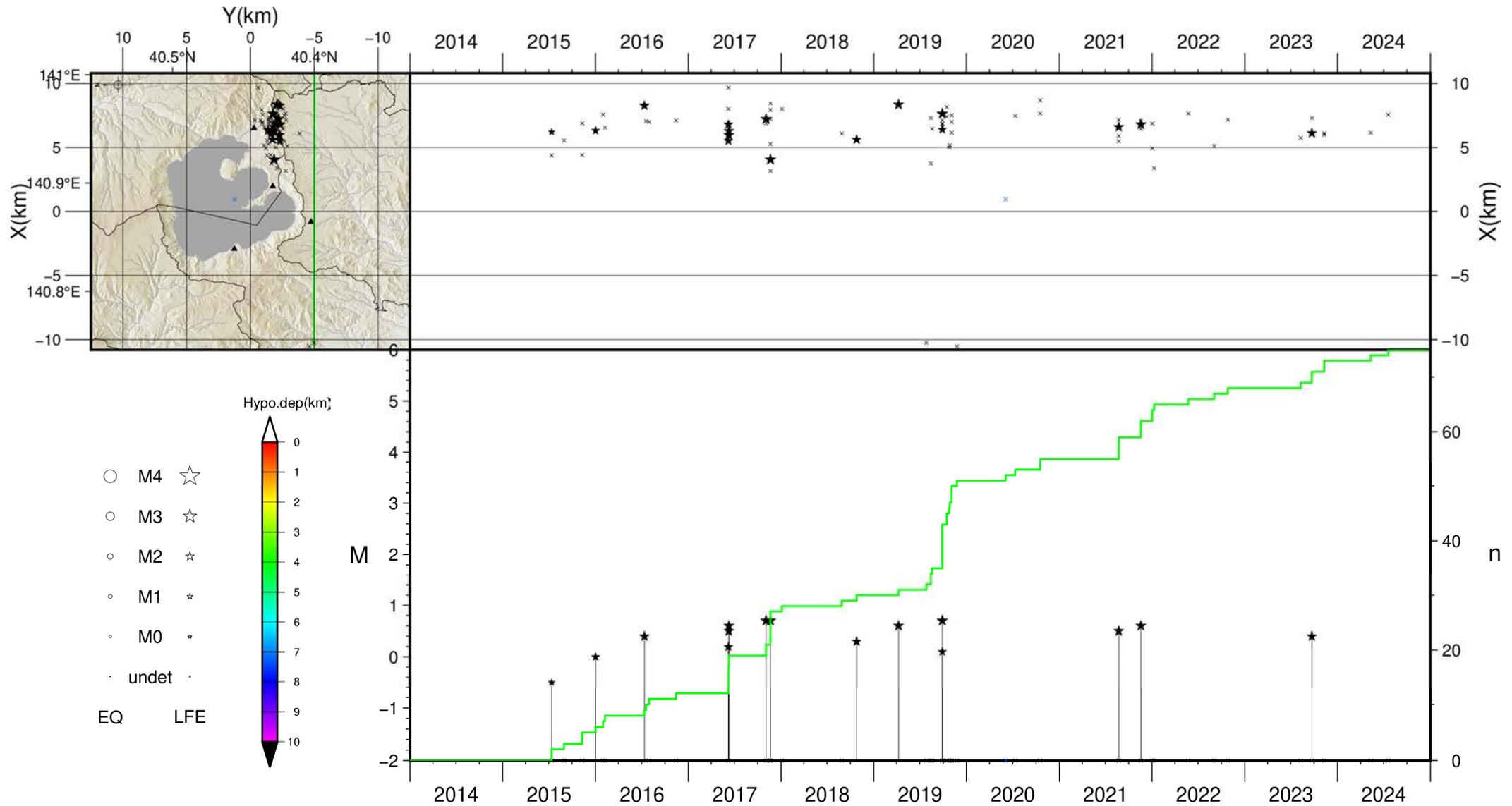
# 十和田湖付近の地震活動 (2014-2024年)



# 十和田湖付近の 低周波地震活動 (2014-2024年)

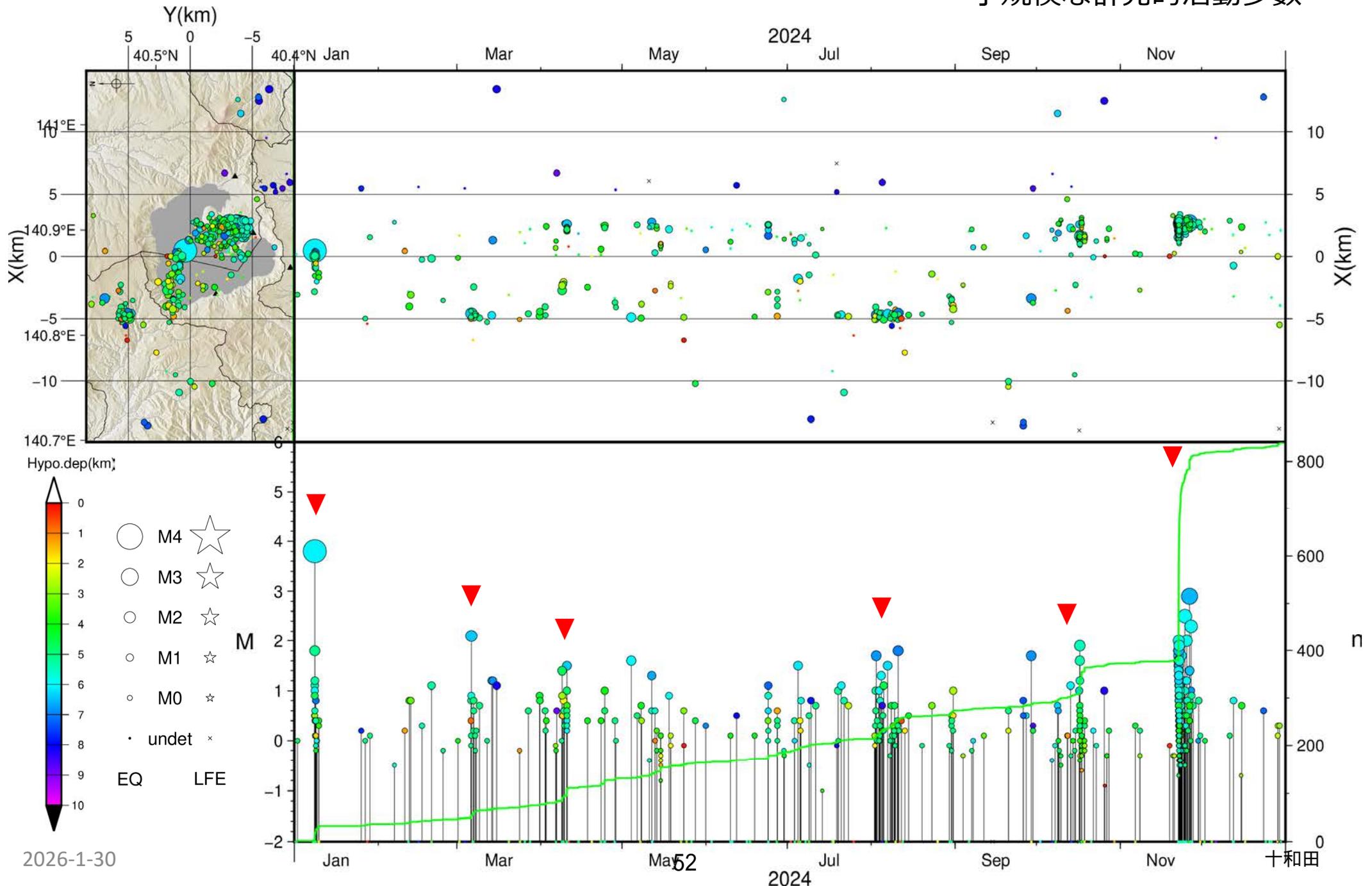


# 十和田湖付近の低周波地震活動 (2014-2024年)

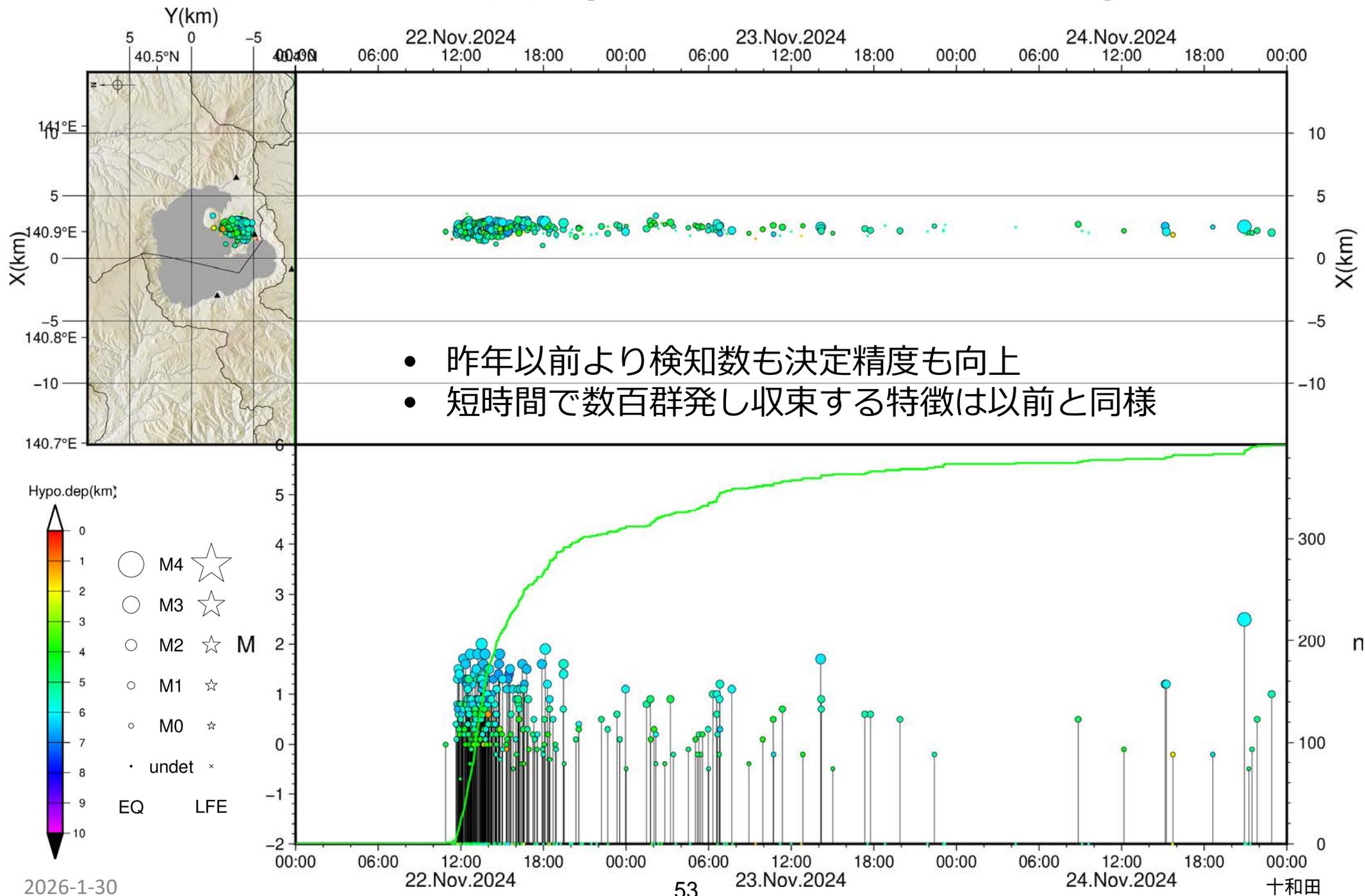


# 十和田湖の地震 (2024年)

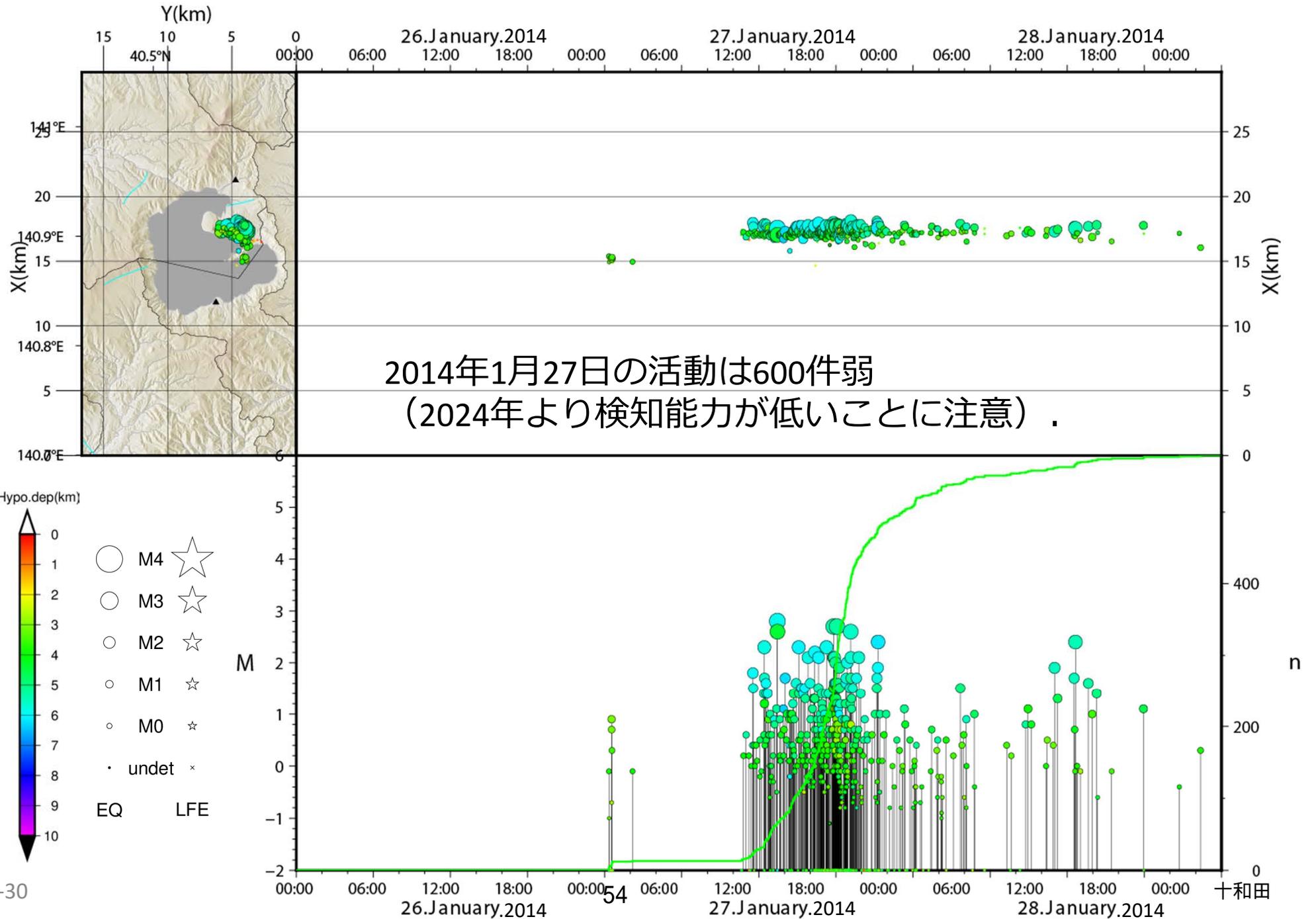
- 小規模な群発的活動多数



# 十和田湖の地震 (2024年11月22-24日)



# 参考；十和田湖付近の地震活動（2014年1月）



# 初動発震機構解

140°E 140.5°E 141°E 141.5°E 142°E

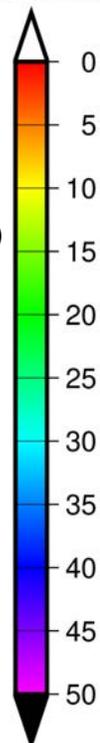
# AS-net 初動発震機構解 (H<50 km)

赤は2024年の地震

\*1 3つ重なっているが  
すべて南北走向の  
逆断層

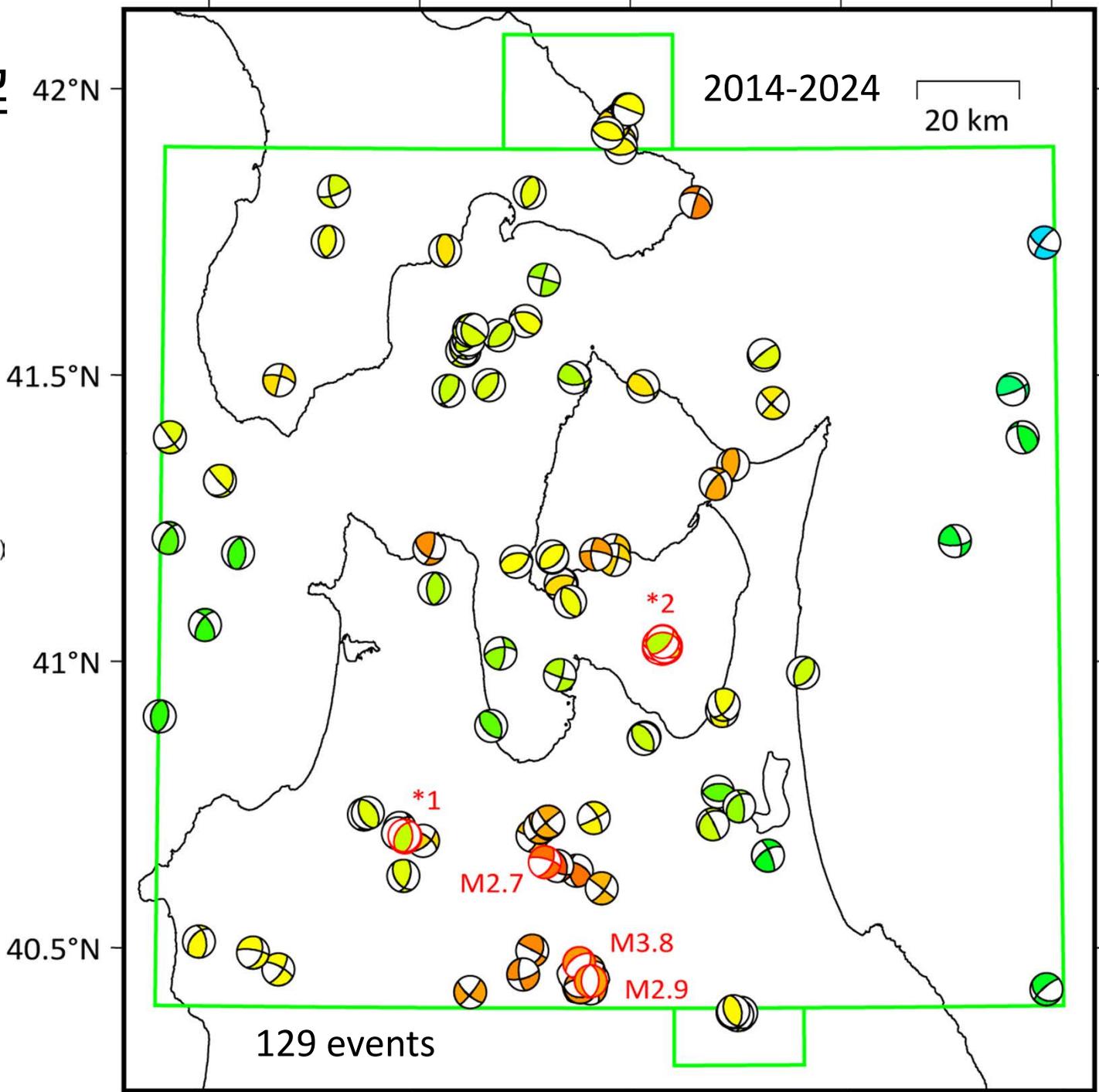
\*2 陸奥湾の地震

Hypo.dep(km)

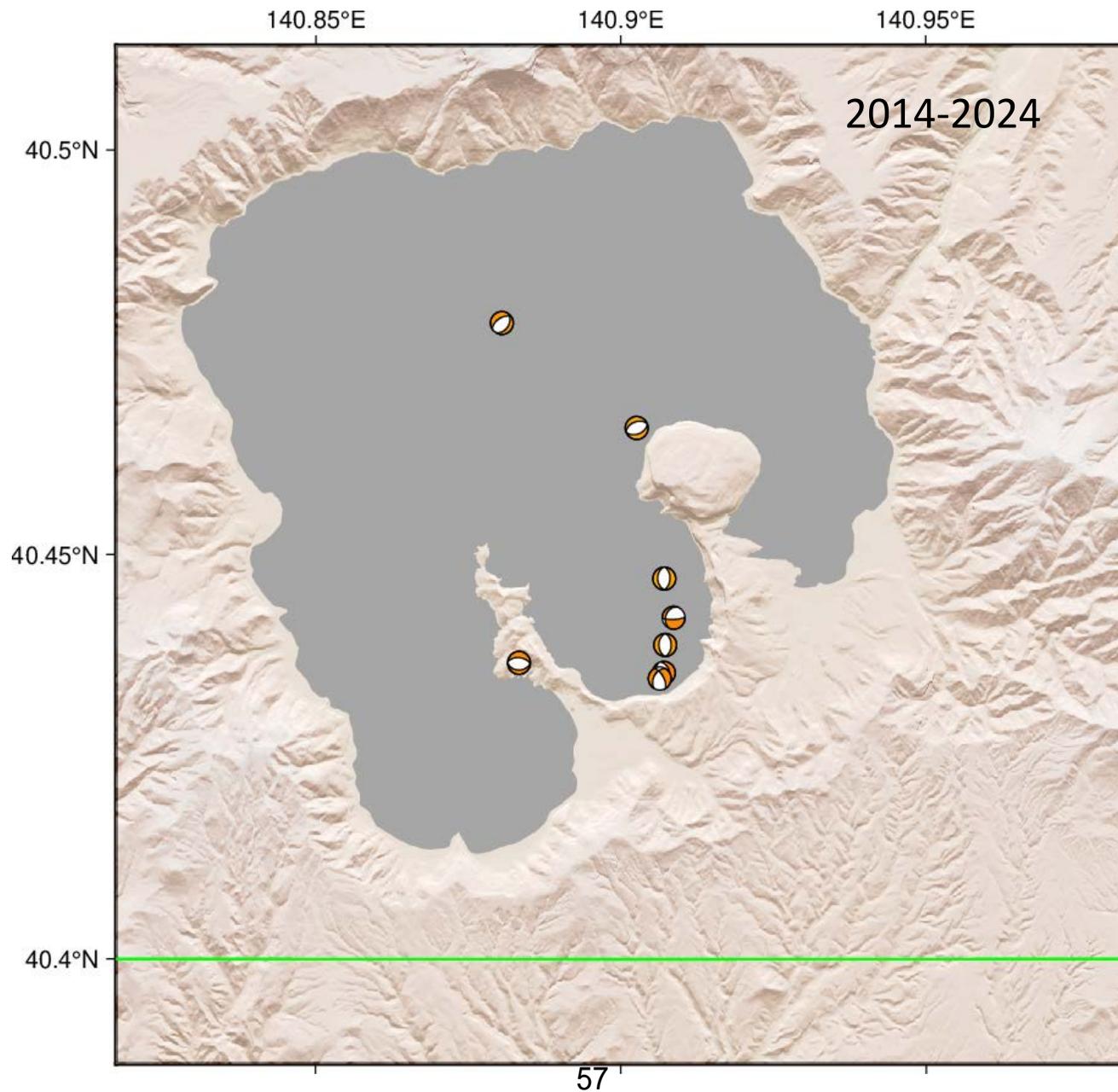


スコア  
(=極性読み取り数-極性不一致数)  
30以上のみ

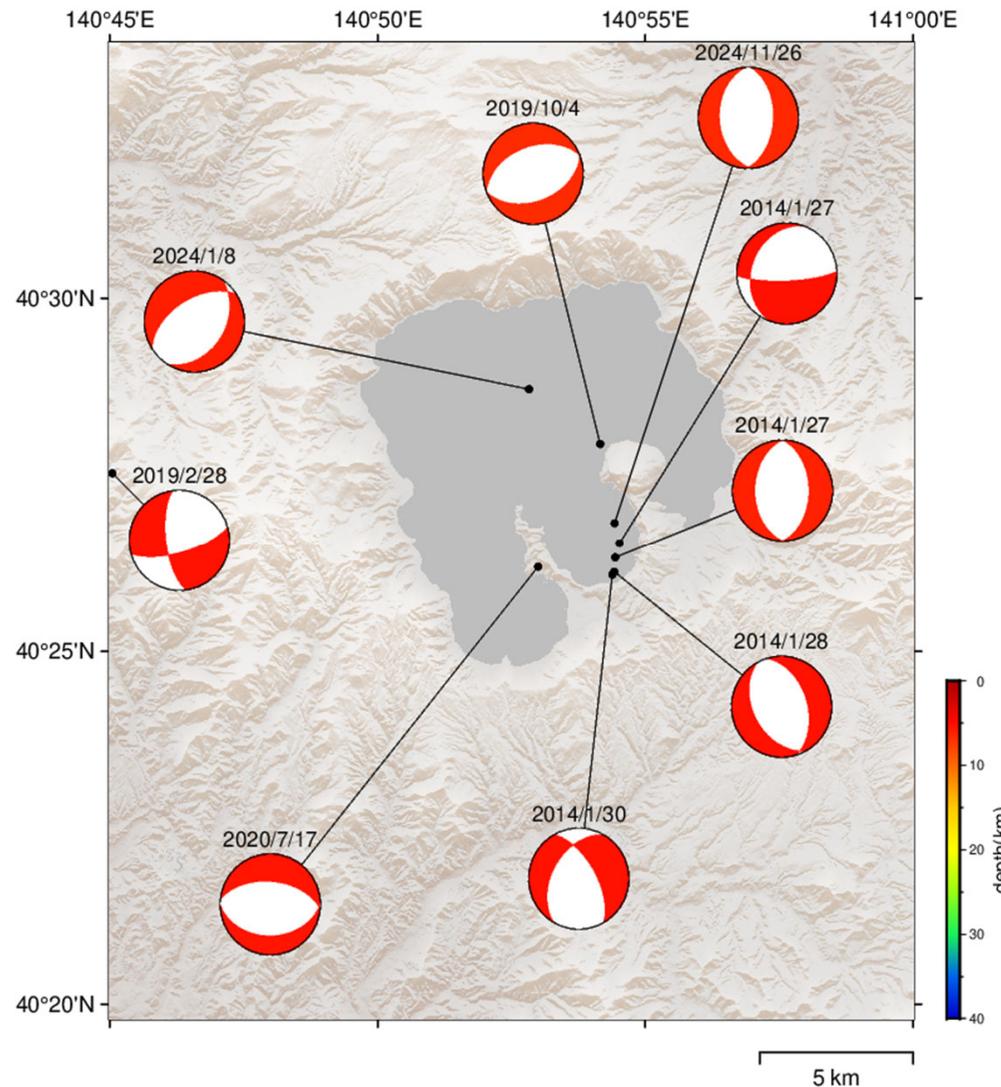
十和田湖付近は  
8イベントあり、  
すべて正断層型



# AS-net初動発震機構解 ( $H < 50$ km)十和田湖付近拡大図

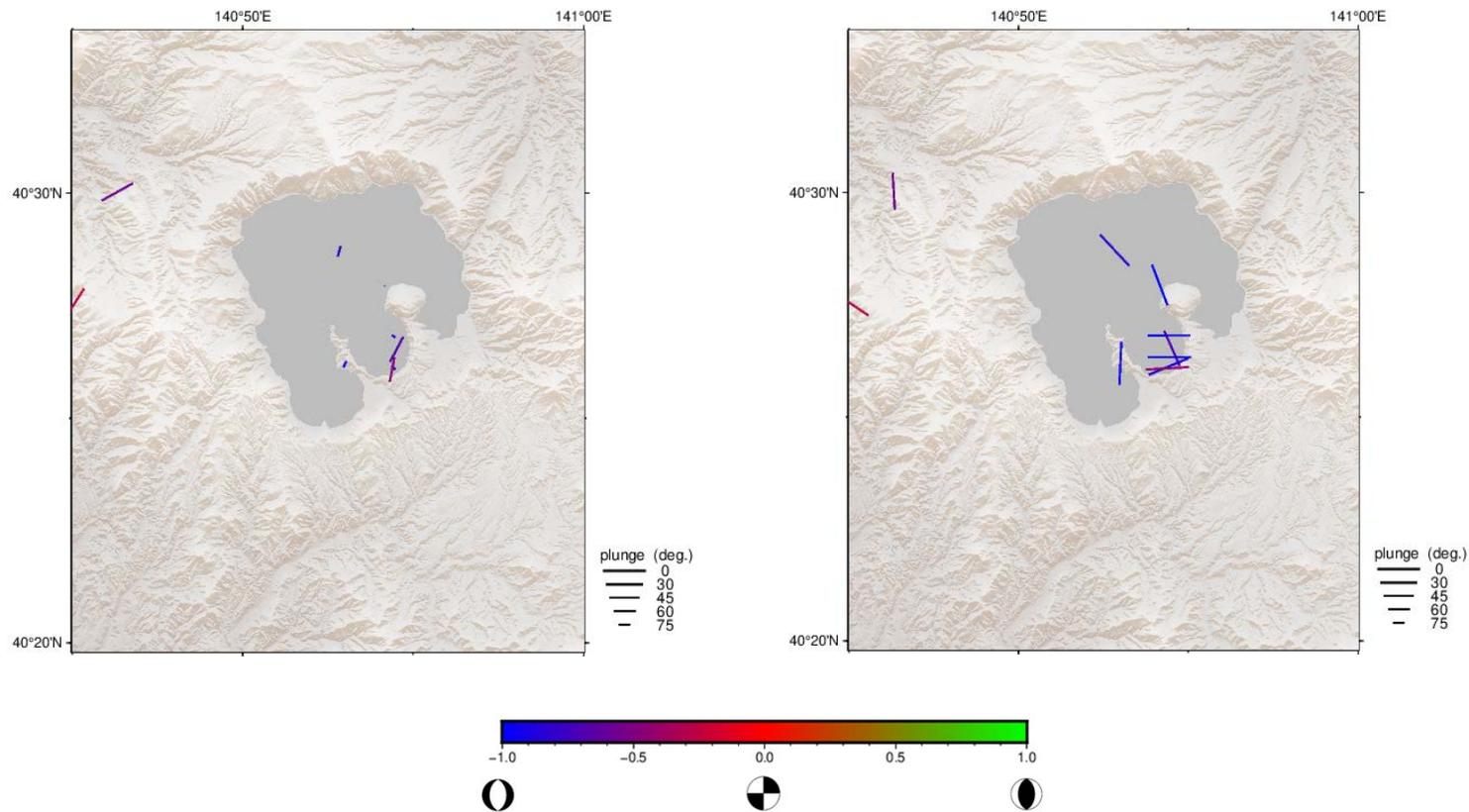


# AS-net初動発震機構解 ( $H < 50$ km)十和田湖付近拡大図②



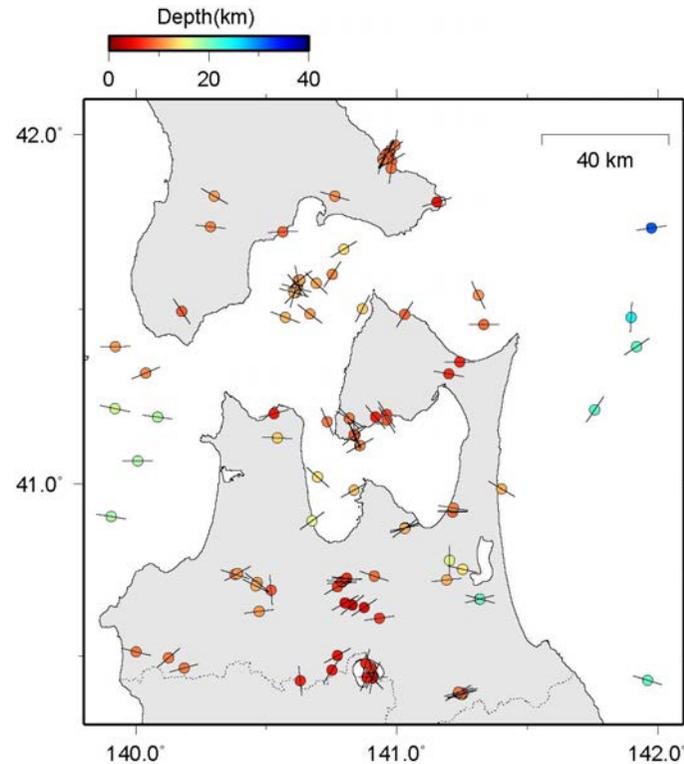
2014年1月～2024年12月に発生した地震のうち推定された発震機構解.

# AS-net初動発震機構解 ( $H < 50$ km)十和田湖付近拡大図 P軸・T軸



発震機構解から得られたP軸(左)とT軸(右)の水平面投影図. 軸の色は地震タイプにより配色 (Shearer et al., 2006) されており, 赤色は横ずれ, 緑色は逆断層, 青色は正断層になる.

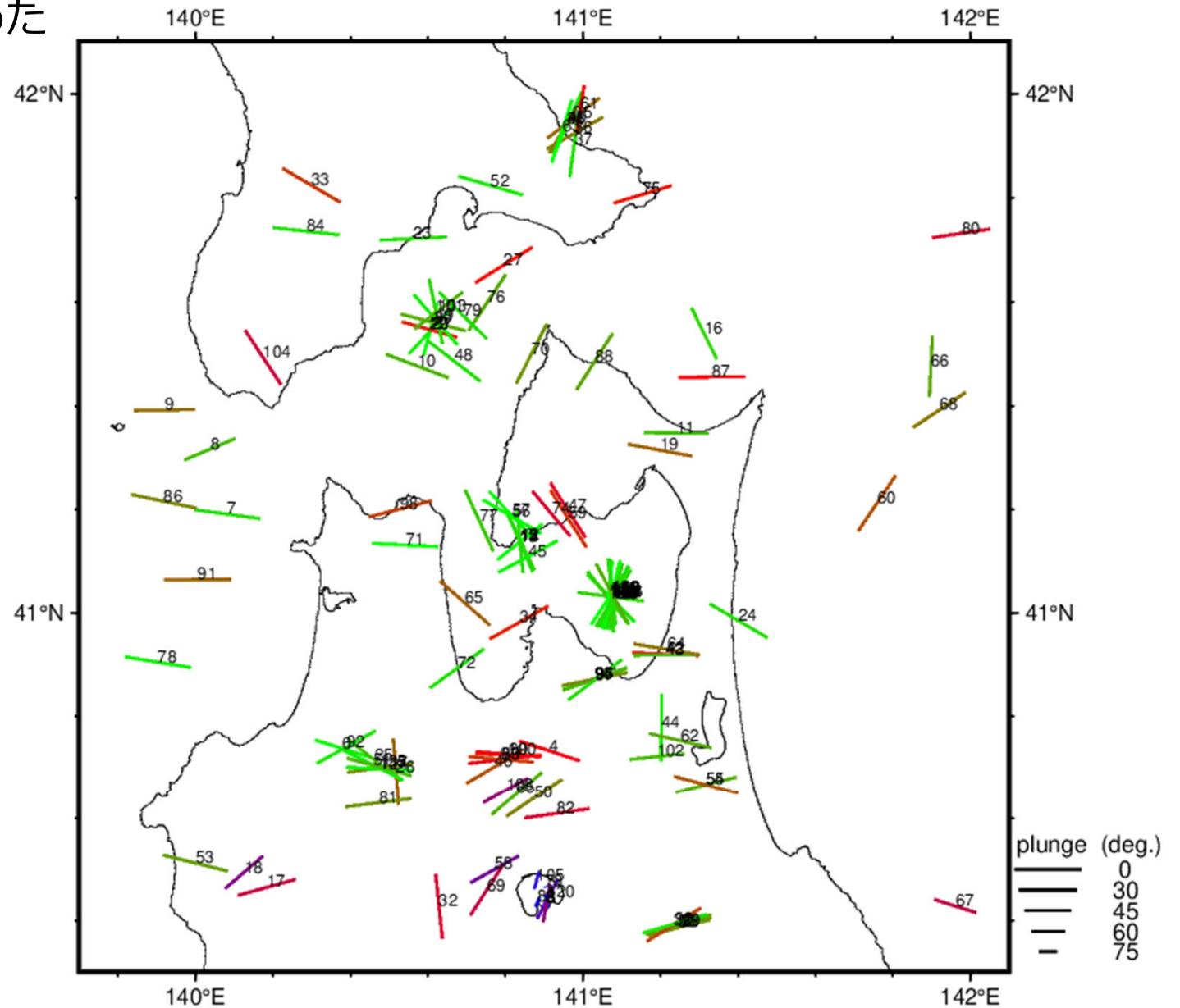
# 初動発震機構解から求めた 主圧力軸（P軸）の方位



(a) 深さ50km以浅の106地震  
(M1.9~5.5)

# 初動発震機構解から求めた 主圧力軸（P軸）の方位

2014~2024  
深さ< 35 km

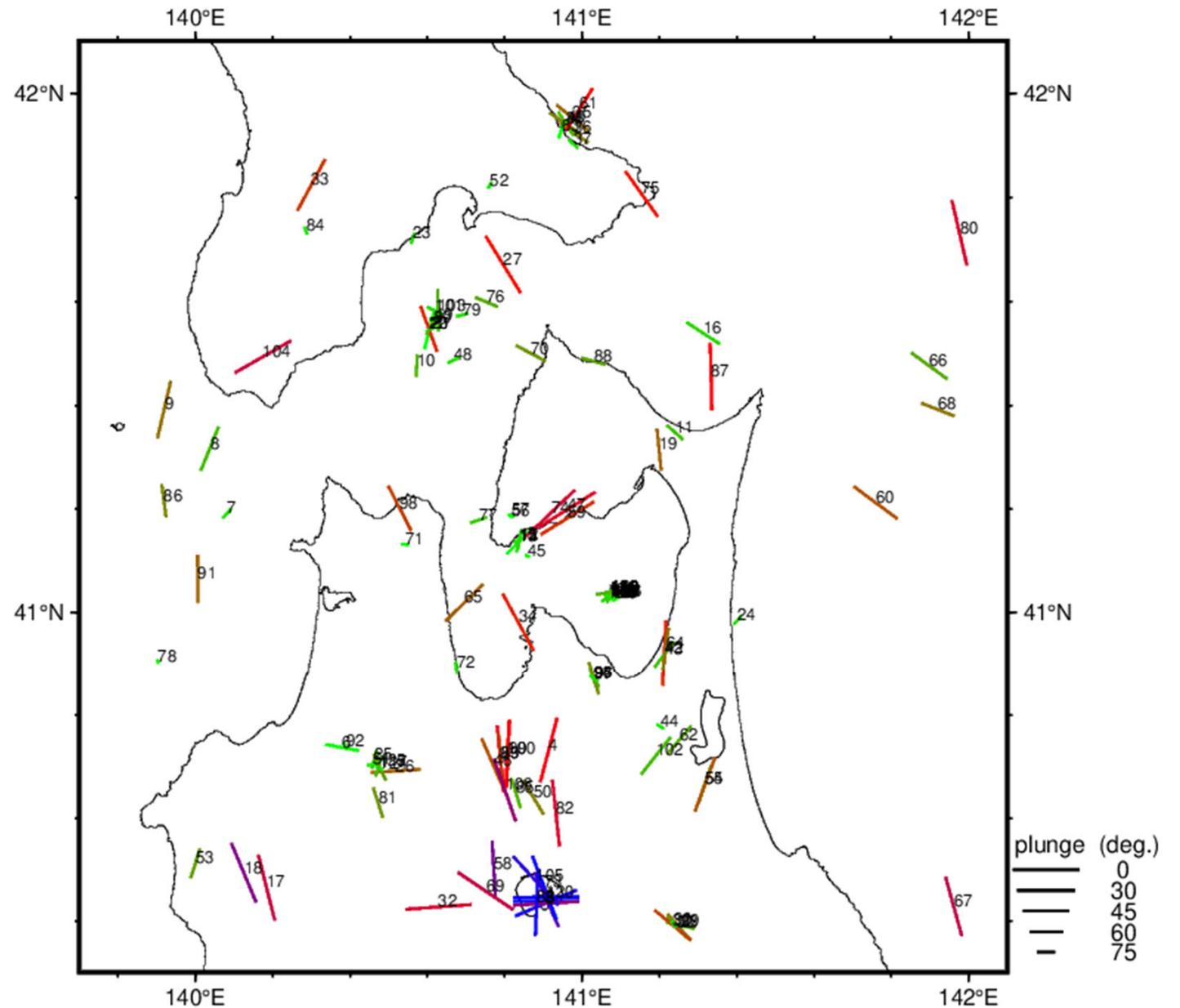


図中の数字は水平面に対するP軸の角度.

# 初動発震機構解から求めた 主圧力軸 (T軸) の方位

## T-axis

2014~2024  
深さ < 35 km



図中の数字は水平面に対するT軸の角度.

