

4. 自然現象による発声音

4.1 日本に到達した2022年トンガ海底火山噴火起源の大気波動

Atmospheric waves arrived at Japan from the 2022 Tonga submarine volcanic eruption

綿田 辰吾 (Shingo Watada)

東京大学地震研究所

(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

1. 地球大気の圧縮性と重力に起因する大気波動

大気中には可聴域 (20 Hz~20,000 Hz) より低い周波数帯域に様々な波動が存在する。本稿では、大気の圧縮性と浮力に起因した復元力を有する、爆発的火山噴火を起源とする線形大気波動現象を取り上げる。図1に標準大気構造(図2左端の2図)中に存在する内部重力波と音波とラム波(大気境界波)の分散関係を示す。

対流圏・成層圏・中間圏・熱圏と高度が上がるに従い、気圧や密度は指数関数的に減少し、対流圏・成層圏・中間圏では気圧や密度のスケールハイトは8—10 km程度である。重力の影響により大気中には周期270秒より長周期の音波は存在しない(熱圏では最長周期約330秒の音波が存在する)。水平方向の位相速度は大気中の最も遅い音速(中間圏で274 m/s)よりも早く、音波波面が鉛直から傾くにつれて見かけ速度は増大する。対流圏・成層圏・中間圏には大気圧縮性の影響に

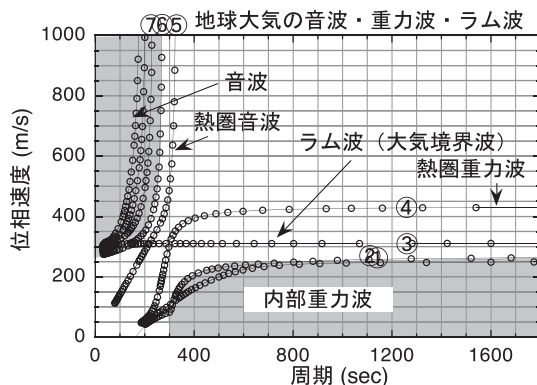


図1 大気波動の分散曲線 丸番号は図2を参照

より周期300秒以下の重力波は存在しない。

図2は大気波動モードの波動エネルギー分布を示している。例えば、図1中の近接した①と②に相当する重力波モードは、それぞれ周期1,140秒と1,229秒、位相速度250 m/sと270 m/s、群速度243 m/sと256 m/sを持ち、①は対流圏・成層圏・中間圏の、②は熱圏下部の波動現象であることがわかる。⑥や⑦に相当する音波モードは、対流圏・成層圏・中間圏・熱圏下部から構成される大気低音速度層に捕獲された音波基本モードと音波1次高次モードであり、周期はそれぞれ270秒と231秒、位相速度は3,654 m/sと4,283 m/sと地震波速度に匹敵するが、群速度は7.8 m/s、12.1 m/sと極端に遅い。これらの音波モードは伝播の波面が水平近くまで傾いており、大気低音速度層の上下で多重反射しながら水平方向にゆっくりと伝播する音波に相当する。さらに高次の音波モードは低速度層内に捕獲さ

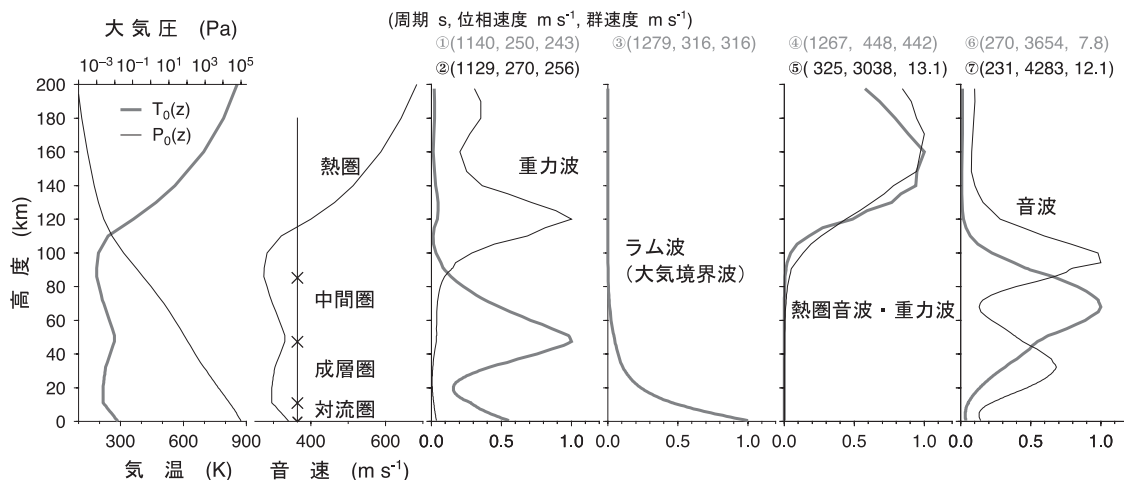


図2 大気構造と音波・重力波・ラム波(大気境界波)のエネルギー高度分布

4.1 日本に到達した2022年トンガ海底火山噴火起源の大気波動

れずに熱圏まで到達し、波動エネルギーを熱圏で散逸するため定在波とならない¹⁾。

大気内の自由波である音波や重力波と異なり、大気境界に沿ってのみ伝播する大気境界波が存在する(図2右から3番目の図)。そのエネルギー高度分布は地表から指数関数的に減少する。そのスケールハイトは背景大気構造のスケールハイトの1.4倍、波動周期に依らず12—14 kmで、全ての周期帯で大気下層の音速にほぼ等しい位相速度と群速度で伝播し、分散性は弱い。重力下で密度成層した有限の圧縮性のある流体に特有な波動で、伝播速度が音速であるため、音波の一種と誤解されやすいが音波ではない。ラム波とも呼ばれる。弾性体に表面に作用する力から生じる弾性波もラム波と呼ばれることがあるため、大気境界波という名称は他分野の専門家にもわかりやすい。

2. 2022年トンガ噴火により発生した大気境界波

2022年1月15日4時15分(世界時)頃、トンガ海底火山で大規模噴火が発生し、全世界で気圧波が観測された。また全海洋域で想定外の津波が到達したことから、火山研究や気象学者や津波研究者も巻き込んだ研究が

精力的に進められている^{2~5)}。

2.1 気象庁アメダスによるラム波観測

気象庁アメダス(地域気象観測システム)では全国約150観測点で気圧・気温・風速・風向を10秒ごとに計測している(図3)。それぞれの最小量子化単位は0.1 hPa, 0.1 K, 0.1 m/s, 1°であり、火山の爆発的噴火により発生する空振のような微弱で短周期の大気波動

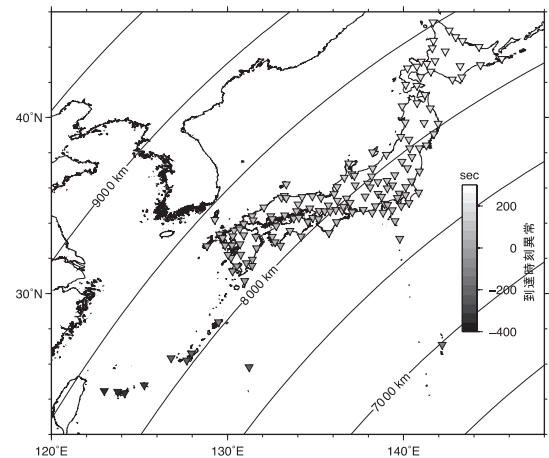


図3 アメダス観測点

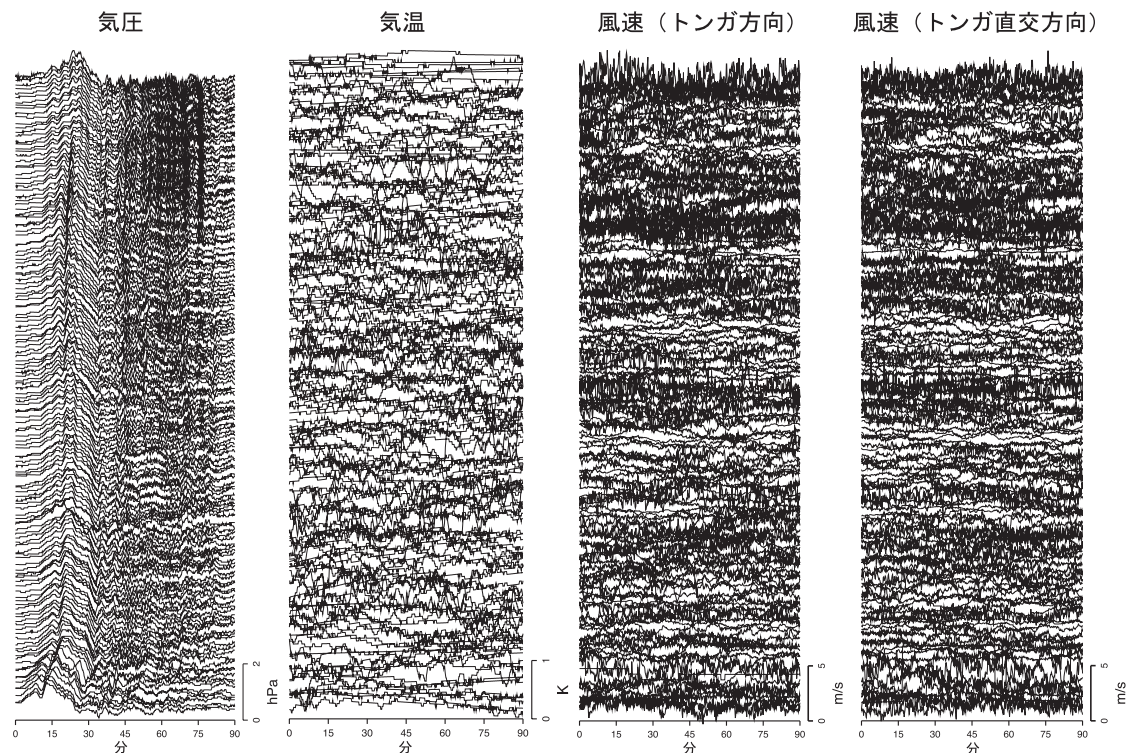


図4 アメダス観測量 トンガから見た方位順(上が北東日本、下が南西日本)

4.1 日本に到達した2022年トンガ海底火山噴火起源の大気波動

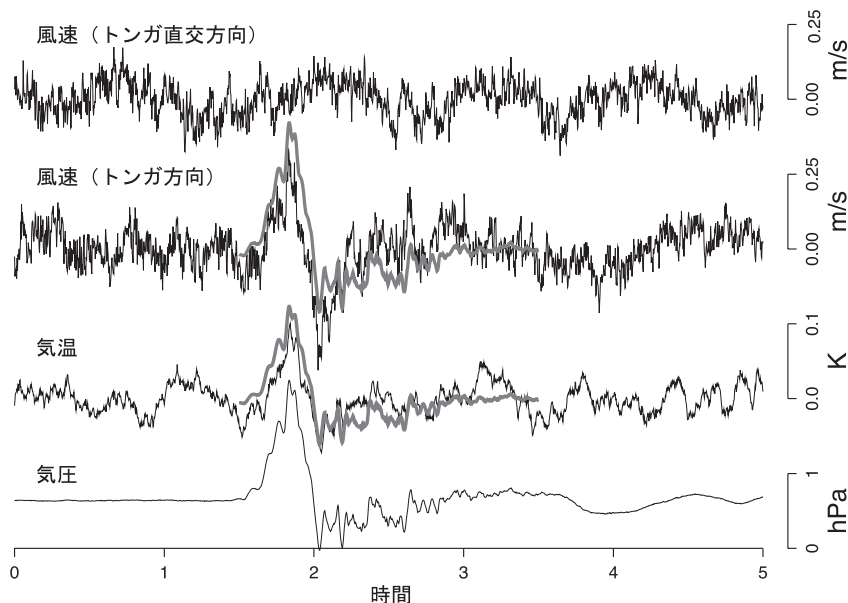


図5 圧力波の到達時刻で揃えた平均風速・平均気温・平均気圧

現象を観測するには不向きである。図4ではアメダス観測点で観測された気圧・気温・風速(トンガからの観測点方向の風速とそれに直交する方向)を表示している。図4左端の気圧記録では、トンガから伝播するラム波速度を一定と仮定して各観測点の時間軸を少しずらし、予想到来時刻が一直線に揃うように並べている。ラム波が気圧変化として全国で観測されている様子がわかる。気温・風速(トンガから各観測点の方向成分と直交成分)には、気圧変化に見られたようなラム波の到来は見出せない(図4)。

2.2 アメダス計測による気温と風速変化の検出

Watada et al. (2023)⁶⁾は、各観測点のラム波気圧波形の相似性に着目し、アメダス観測点の平均的な気圧波形と各観測点の気圧波形の相互相関関数から、アメダス気圧データの到達時刻時刻差を計測した。図3はトンガからの距離とラム波の平均的な伝播速度(304 m/s)から予測される到達時刻から最大6分程度前後してラム波が日本列島に到達している様子を示し、南西日本には早く(負の到達時刻異常)、北東日本には遅く(正の到達時刻異常)到達している。図4の左端に並べられた気圧波をよく見ると、下方(南西日本)の記録は上方(北東日本)の記録と比べると少し早くラム波が到達しているのが確認できる。このラム波到達時刻異常の成因については2.4章で解説する。

計測された各観測点の気圧波の到達時刻が揃うよう

に、各種アメダス観測量の時刻をずらしてアメダス観測網の平均的な気圧波・気温・風速を求めてみた。大気中に常に存在する大気乱流に起因する気温・風速擾乱のため、各観測点の記録では見出せなかったラム波に伴う気温変化と風速変化は、平均操作により背景雑音が低減され、ラム波に付随する気温変化とトンガ方向の風速変化として検出された(図5)。図5の平均気温と平均風速(トンガ方向)に太線で書き加えられている気温・風速変化は、ラム波の伝播を仮定し、以下の理論式を用いて気圧変化から予測された。

$$\Delta T = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{T}{P} \Delta P \quad (1)$$

$$u = \frac{\Delta P}{\rho_0 c} \quad (2)$$

ここに ΔP は気圧変化量、 ΔT と u は気温変化量とラム波進行方向の風速変化量、 T 、 P 、 ρ_0 、 c 、 γ はそれぞれ、ラム波が伝わる大気の気温、気圧、密度、音速、定積と定圧の比熱比である。トンガ直交方向の風速変化が検出されず、計測された気温とトンガ方向の風速変化は理論予測とよく合っていたことから、ラム波に伴う気圧・気温・風速変化が検出されたと判断される。

Watada et al. (2023)⁶⁾はトンガ火山噴火直後4日間のアメダス連続気圧波形を、図4左端で計測されたラム波の圧力波変動が揃うよう時刻をずらした平均気圧記録中に、トンガからのラム波がさらに地球を一周し、

36時間半後に再び日本に到達したラム波を検出した。直達ラム波と周回ラム波の到達時刻差から世界平均のラム波の伝播速度を、振幅比から減衰率を求めている。

2.3 ラム波により運ばれた波動エネルギーの見積

重力波や音波やラム波の波動エネルギーは、波動の運動エネルギーと圧縮性ポテンシャルエネルギーと重力ポテンシャルエネルギーの和であり、重力波や音波やラム波で輸送される波動エネルギー流束密度ベクトル I は以下の式で表される。

$$I = \Delta P u \quad (3)$$

ここに、 u は風速ベクトルである。火山を取り囲む閉曲面を通過する波動エネルギー流束密度を面積分し、波束の経過時間で時間積分すると、火山から発生した大気波動が輸送する全波動エネルギーが計算できる。ラム波の場合、気圧変動量と風速の鉛直構造(=スケールハイト)はよく知られている(図2右端から3つ目の図)ため、火山を中心とする軸対称な波動場を考えると、1点の地表観測の風速と圧力変化記録から、ラム波が輸送する全波動エネルギーが計算される。ラム波の減衰率を考慮し、日本のアメダス記録を用いて推定すると、トンガ火山噴火で発生したラム波で輸送される全エネルギーは 4.2×10^{16} J、ほぼ10メガトンTNT爆発エネルギーに等しい。このエネルギー見積には他の大気波動(音波や重力波)・地震波・津波・火山噴出物も持つ熱エネルギーや運動エネルギーが含まれていないため、噴火で放出されたエネルギーの下限である。

2.4 ラム波の到達遅延時間の見積

図3や図4に見られるように、ラム波の到達時刻は各観測点位置に依存して変化している。図6では計測された到達時刻の遅れをトンガから見たアメダス観測点の方位の関数として表示している(+印)。方位は北から東周りを正に取っている。系統的に北海道から西南日本にかけて次第にラム波が早く到達している。

ラム波の伝播速度は気温と風速により変化する。ラム波は音速で伝播し、大気音速

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma P_0 V_0}{m}} = \sqrt{\frac{\gamma n R T}{m}} \quad (4)$$

は大気密度 $\rho_0 = \frac{m}{V}$ (体積 V あたりの質量 m) を介して温度の関数となる。 n は PV/RT で与えられるモル数で R は気体定数である。式(4)に従い音速は気温の平方根に比例して変化する。

アメリカ大気研究センター(NCAR)が6時間ごとに

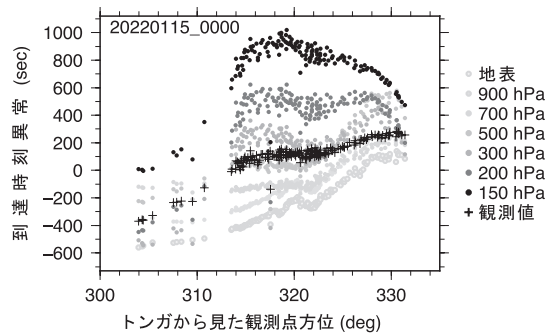


図6 計測遅延時間と予測遅延時間の比較

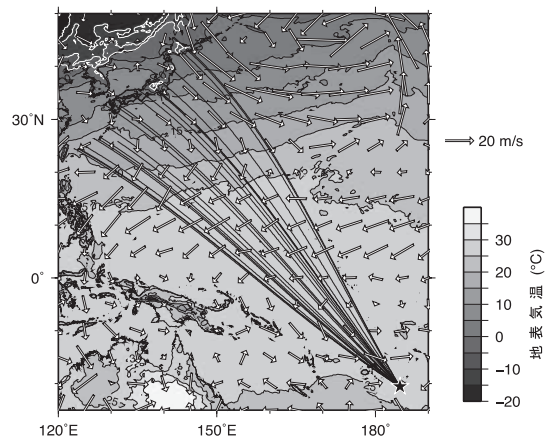


図7 ラム波伝播経路上の地表風速と地表気温

公表している全球大気モデルの気温と風速分布に基づいて、ラム波の到達時刻遅延量を見積る。気温と風速の影響を簡便に見積もるため、それぞれの高度(または気圧)の気温と風速が、地表から高層まで一様に分布すると仮定し、その仮想的な気温と風速によりラム波が遅れる時間を図6に表示した。トンガから日本への伝播経路上では、日本上空の強い偏西風が存在するため北日本へ到達するラム波ほど偏西風の影響を受け、加えて緯度が高い経路では気温低下により伝播速度が低下する(例えば図7、2022年1月15日12時(世界時)の風速・気温分布)。観測された西南日本から北海道までの系統的な到達時刻遅延時間の変化は、風速と気温の影響により説明可能な範囲にある。遅延時間の正確な見積もりのためには、高度と共に気温と風速・風向が変化する、より現実的な大気モデルに対して、ラム波の到達遅延時間を見積もる必要がある。

2.5 ひまわり衛星画像との比較

Otsuka (2022)⁷⁾は静止気象衛星ひまわりが撮影し

4.1 日本に到達した2022年トンガ海底火山噴火起源の大気波動

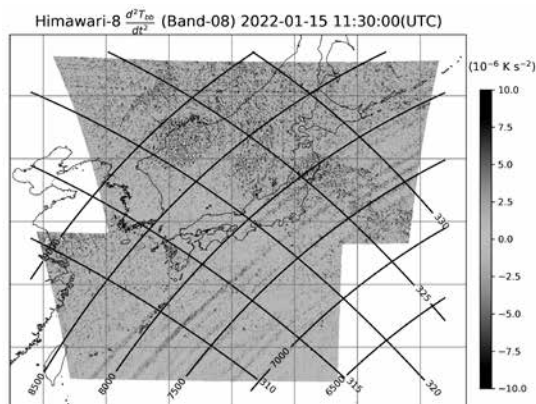


図8 静止気象衛星ひまわり赤外画像の時間差分

た10分毎の赤外画像の時間差分から、ラム波伝播速度で同心円状に広がる熱異常を検出し、西南日本へ到来するラム波が系統的に早く到達していることを報告している。図8では同様の時間差分を、静止気象衛星ひまわりが2.5分毎に撮影した日本付近の赤外画像から作成した⁶⁾。この画像でも同心円状に広がるラム波が、西南日本へは系統的に早く到達していることが確認できる。

3. 被害を引き起こす他の大気波動現象との比較

トンガ火山の爆発的噴火は人工構造物から離れた離島で発生したため、人工構造物への空振による被害は報告されていない。トンガ国外での最大気圧変化は5 hPa⁵⁾以下、日本付近では2 hPa程度で、圧力変動の周期も20分程度(図5)と長かったためと考えられる。2 hPaは地表付近の高度差約17 mに相当する気圧差で、ゆっくりとした変動であれば構造物への影響はない。

3.1 火山爆発による空振被害

霧島新燃岳で2021年2月1日7時54分(日本時)に発生した中規模の爆発的噴火では、火口から南西約3 kmの観測点で4.58 hPaを観測し⁸⁾、山麓の霧島市では空振によるガラス破損の被害が多数発生した⁹⁾。この爆発的噴火の圧力波は、トンガ噴火で発生した圧力波よりも波長が極めて短く、閉鎖構造物の内外で急激に気圧差が発生しガラスや壁面に損傷を与えたと考えられる。噴煙高度と空振圧力は必ずしも比例しない。また、火山等に設置されている空振計は気圧計とは異なる

り、応答帯域が限られるため、空振計で計測された圧力変動量と気圧計の気圧変動量は直接比較できない。

3.2 火球(隕石)による空振被害

2013年2月1日3時20分(世界時)にロシア連邦チェリャビンスク州(Chelyabinsk)に落下した隕石は、大気圏通過時に衝撃波を発生しながら分裂した。古い煉瓦造りの工場が、衝撃波により破壊されたと思われるなどの被害があった。YouTube で衝撃波到達時の構造物(主にガラス窓や建物の外壁)の破壊の記録映像を多数見ることができる。

包括的核実験禁止条約機関(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, CTBTO)が運営する国際監視制度(International Monitoring System, IMS)微気圧観測網により、周期20–70秒の地球を周回する音波が捕らえられた。最大振幅は落下地点から6,000 km離れたアラスカで18 Paであった。一方530 km離れた地点での振幅は12 Paであり、伝播方向により大きく振幅が異なる原因は大気中の長い通過軌跡と風等の大気状況が時間空間変動したためとされる¹⁰⁾。

[参考文献]

- 1) S. Watada, H. Kanamori : Acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid earth during the 1991 Mt. Pinatubo eruption, J. Geophysical Research, 115, B12319, doi : 10.1029/2010JB007747, 2010
- 2) 前野深 : 地球を震わせたフンガ火山の爆発的噴火, 岩波科学, No. 92, pp. 559-564, 2022. 6
- 3) 綿田辰吾 : 遅れてやってきた2022年フンガ火山噴火起源の最大波高津波, 岩波科学, No. 92, pp. 565-570, 2022. 6
- 4) T. Kubota et al. : Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption, Science, 337(6601), pp. 91-94, 2022
- 5) R. Matoza et al. : Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga, Science, 337(6601), pp. 95-100, 2022
- 6) S. Watada et al. : Detection of air temperature and wind changes synchronized with the Lamb wave from the 2022 Tonga volcanic eruption, Geophysical Research Letters, 50, e2022GL100884, doi : 10.1029/2022GL100884, 2023
- 7) S. Otsuka : Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8, Geophysical Research Letters, 49(8), doi : 10.1029/2022GL098324, 2022
- 8) 福岡管区気象台火山監視・情報センター : 霧島山の火山活動解説資料, 平成23年2月, 2011. 2
- 9) 内閣府 : 霧島山(新燃岳)の噴火による被害状況について, 平成23年3月7日, 2011. 3
- 10) A. Le Pichon, et al : The 2013 Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors, Geophysical Research Letters, 40(14), pp. 3732-3737, doi : 10.1002/grl.50619, 2013