

静止気象衛星高頻度観測データを用いた火山噴火に伴う大気波動の検出

村上太一¹, 田中健路^{1, 2}

¹ 広島工業大学大学院工学系研究科・² 広島工業大学環境学部地球環境学科

1. はじめに

2022年1月15日にフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火に伴ってLamb波やPekeris波、内部重力波といった大気波動が発生し世界中に伝播した。これらの大気波動は、気圧変化を伴う波として世界各地で観測され、気圧変化によって気象津波と呼ばれる海洋長波を駆動し、世界中の沿岸で大きく増幅された二次振動として観測された。この気象津波によって西日本の漁港では、漁船の流失、転覆、沈没被害が発生した。Lamb波はOtsuka(2022)によってひまわり8号のフルディスク輝度温度データ(毎10分)を用いて可視化され、Pekeris波はWatanabeら(2022)が気象衛星と再解析データを用いて可視化された。^{[1], [2]}しかし、これらの大気波動では西日本沿岸での気象津波の増幅を説明することはできない。気象津波増幅には太平洋平均水深と対応する約200 m/s程度の速度を持つ大気波動の存在が不可欠である。ひまわり8号は日本域の観測に限れば毎2.5分の観測が可能であり、より細かな温度変化を捉えることが可能である。そこで本研究では、ひまわり8号の日本域における高頻度観測の輝度温度データを用いて、気象津波発達に関連する大気波動の検出と解析を行う。

2. 研究方法

2.1 使用データ

今回の噴火事例に関する実況解析データとして、静止気象衛星ひまわり8号のBand-7~16の10チャンネルの赤外輝度温度データ(日本域0.02度格子, 毎2.5分間隔)と気象庁(南鳥島での1分間観測を除く10秒間観測)と地震研究所(IRIS)(1秒間観測)の地上気圧記録と気象庁(15秒観測), 国土交通省港湾局(0.5秒観測), ユネスコ政府間海洋委員会(UNESCO-IOC)(Flanders Marine Institute(VLIZ) and IOC, 2023)(1分観測)から潮位データ, ETOPOの海底地形データ, NCEP FNLの再解析データを使用した。解析期間は2022年1月15日10:00~18:00UTCである。

2.2 研究方法

① ひまわり8号のBand-7~16の赤外輝度温度データ(解析範囲: 26N-42N, 126E-142E)を中央差分法で時間二階微分を行った。^[1]

$$\frac{\partial^2 T_{bb}(x, y, t)}{\partial t^2} \approx \frac{T_{bb}(x, y, t + \Delta t) - 2T_{bb}(x, y, t) + T_{bb}(x, y, t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} \quad (1)$$

② (1)式の計算結果をさらに時間二重積分(T_a)を行った。

$$T_a + C_1 t + C_0 = \iint \left(\frac{\partial^2 T_{bb}(x, y, t)}{\partial t^2} \right) dt^2 \quad (2)$$

③ T_a の各画素に平面二次元バンドパスフィルタ(通過帯域の波長範囲は0.3~4.0度)を適用し、その後5~36分周期の通過帯域を持つバンドパスフィルタを適用し、ノイズ除去処理を行い、大気波動による輝度温度のゆらぎを検出し、波面の位相速度を求めた。

④ T_a の位相速度, 方位角を考慮したネットワーク平均(解析範囲: 28N-32N, 130E-134E)を算出し、大気波動の波形を検出した。

⑤ 気象庁の気圧データを用いて④と同様の手法でネットワーク平均を算出し、比較した。

⑥ T_a と潮位と地上気圧をそれぞれ連続ウェーブレット解析を行い、比較した。

⑦ 大気波動の位相速度と水深を用いてフルード数($Fr = c/\sqrt{gh}$)を算出し、共鳴条件を満たす海域を調べた。

2.2. 大気波動による気圧変化と温度変化

大気波動を衛星観測から検出するには気圧変化によって発生する温度変化に着目する必要がある。Lamb 波の場合を考える。Lamb 波は鉛直風擾乱を持たない大気波動であるため次の式で与えられる。

$$T_a = \gamma \left(\frac{T_0}{p_0} \right) p_f \quad (3)$$

ここで T_0 は平均気温、 p_0 は地上気圧、 p_f は気圧偏差、 γ は乾燥空気と定圧比熱である。2.0 hPa の振幅を持つラム波と日本の冬の典型的な値を代入すると約 0.16 K の温度変化が与えられる。

Pekeris 波と内部重力波の場合を考える。この2つの波は鉛直風擾乱を持つため次の形で与えられる。(Andrews et al (1979)式 3.1.3e' を線形化) [3]

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + \omega \left[\frac{H}{p} \frac{\partial T_0}{\partial z} + \frac{\gamma T_0}{p} \right] = 0, \quad (4)$$

ここで ω は気圧変化速度($\omega = (p/H)w$)、 w は鉛直速度、 H はスケールハイトである。ここでスケールハイト 7 km 中層大気の温度 240K、鉛直温度勾配を $1 \times 10^{-3} \text{ K m}^{-1}$ 、波周期を 600 秒とすると温度振幅は 0.05 K が与えられ、衛星解析で可視化されることが期待される。

3. 研究結果および考察

3.1. ひまわり 8 号の観測によって可視化された大気波動

図 1, 2, 3 にひまわり 8 号全赤外バンドと Band-12-Band-13 で解析された大気波動の例を示す。1 月 15 日 10:30~12:30UTC 頃にかけて Lamb 波の伝播、12:30~14:30UTC 頃に Pekeris 波の伝播、13:00~18:00UTC 頃に内部重力波の伝播による波の波形が可視化された。Lamb 波は全ての赤外バンド捉えられ、Pekeris 波は成層圏と地上付近に応答を持つ Band-12 と成層圏に特化している Band12-Band-13 で捉えられ、内部重力波は Band-12 と Band12-Band-13 で明瞭に、Band-8 でわずかに捉えられ、それ以外のバンドでは領域南西側に限り捉えられている。時間間隔 2.5 分の衛星画像から波面の位相速度を算出すると、Lamb 波の平均速度は $284.2 \pm 19.0 \text{ m/s}$ 、内部重力波の平均伝播速度は $199.1 \pm 10.0 \text{ m/s}$ となった。内部重力波が Lamb 波と Pekeris 波と比べ北寄りに伝播しているのは上空の偏西風の影響を受けたとされる。

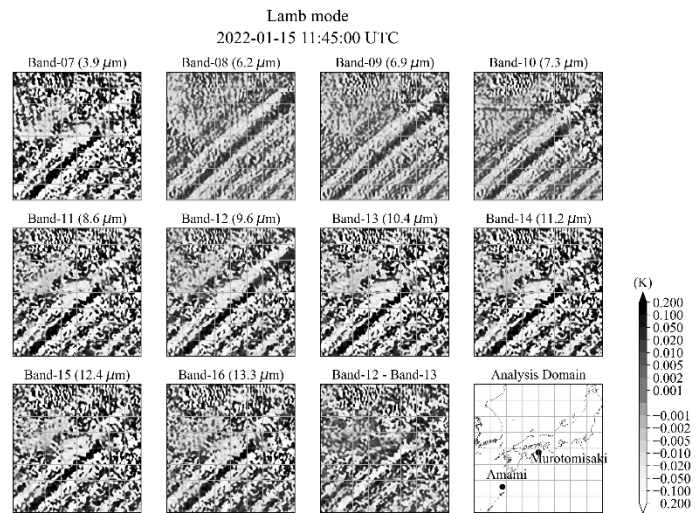


図 1 Lamb 波到達時のスナップショット

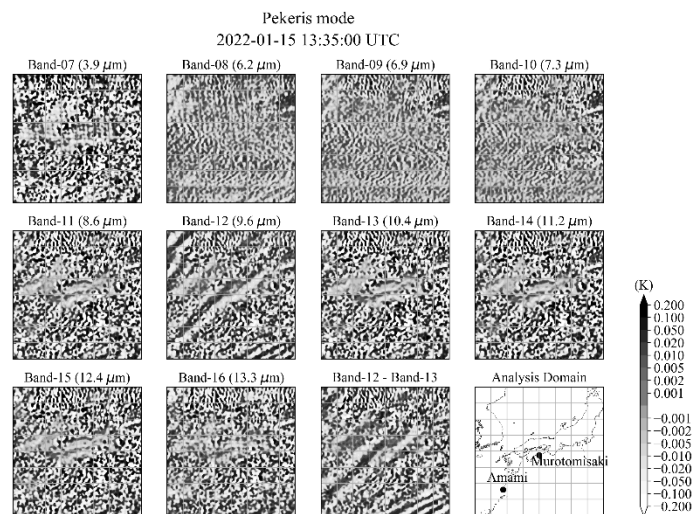


図 2 Pekeris 波到達時のスナップショット

3.2. ネットワーク平均処理によって検出された波の波形

図4にBand-8, 9, 10, 12-13, 13の波形, 図5に地上気圧の波形を示す. Lamb波は10:00~12:00UTC, Pekeris波は12:00~13:30UTC, 内部重力波は13:30~18:00UTCで表示している. 各バンドの並び方は高度と対応している. Lamb波の波形は地上付近に対応しているBand-13で応答が強く, 次いでBand-12-Band-13で応答が強く, その後に対流圏中上層に対応しているBand-8, 9, 10で弱い応答が捉えられた. Pekeris波の場合では成層圏と地上付近で強く応答しており内部重力波では成層圏でより強くそれに次いで地上付近, その後対流圏上部に対応しているBand-8で弱く応答している. この解析結果はIshizakiら(2023)図4に示されたLamb波とPekeris波の鉛直構造とよく対応している. [4]

地上気圧とBand-13を比較すると波形はよく対応している. 図3の右軸に示した気圧を温度変換(式4)したものと輝度温度を比較すると, 輝度温度のほうが高く表示されているが, これは衛星観測が気圧変化以外の温度変化も捉えているためと考えられる. 以上から衛星観測から地上気圧変化を捉えることができる.

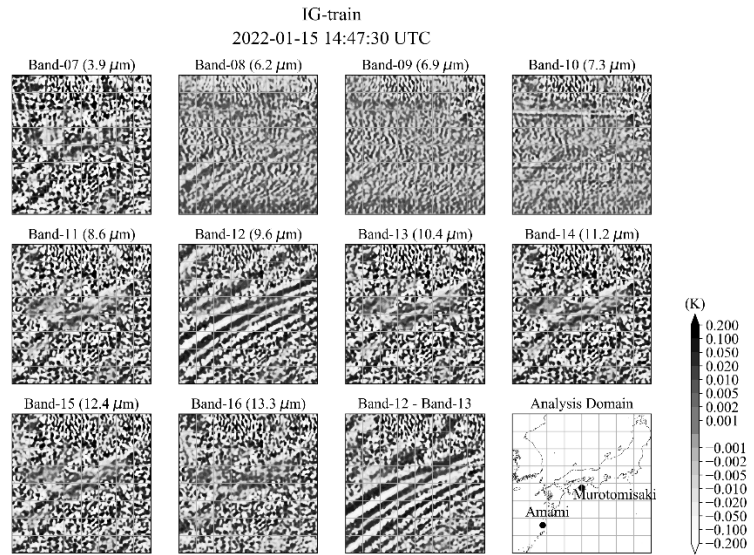


図3 内部重力波到達時のスナップショット

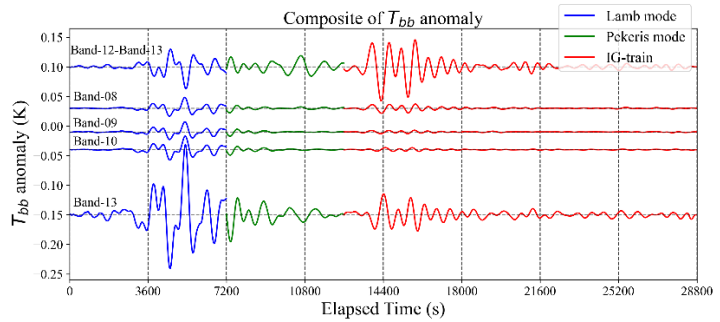


図4 輝度温度ネットワーク平均を用いて抽出された波形

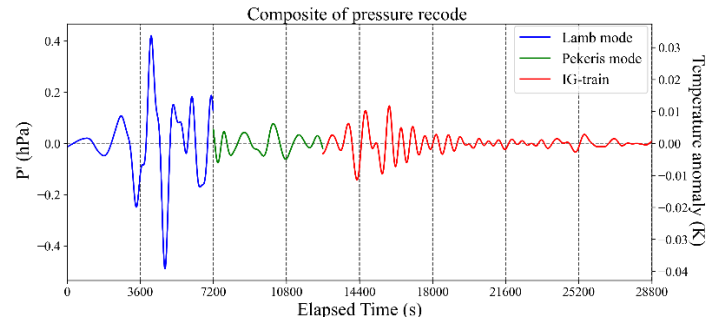


図5 地上気圧ネットワーク平均を用いて抽出された波形

3.3. 連続ウェーブレット変換を用いた地上気圧, 潮位, 衛星観測の比較

図6は名瀬と室戸岬における地上気圧, 潮位, 赤外輝度温度の連続ウェーブレット解析の結果を示す. 名瀬におけるLamb波による地上気圧は11:30UTC頃に周期7~7.5分のピークが現れている. これを赤外輝度温度と比較すると, 同時間帯, 同周期にピークが現れている. また潮位をみるとピーク到達後に遅れて数cmの潮位上昇が見取れる. 次に内部重力波の場合だと, 到達時間である14:20UTC頃に地上気圧では周期10~13分程度の気圧変化が現れ, 赤外輝度温度では同時刻帯, 同周期にピークが現れている. 潮位では14:40UTC頃に同周期に潮位の急上昇が捉えられている. 地上気圧や衛星観測と比べ潮位の変化が遅れているのは港湾に到達した気象津波が湾内の固有振動による潮位の急上昇のプロセスを挟むため, タイムラグが発生したと考えられる. また室戸岬でも同様の結果が得られた.

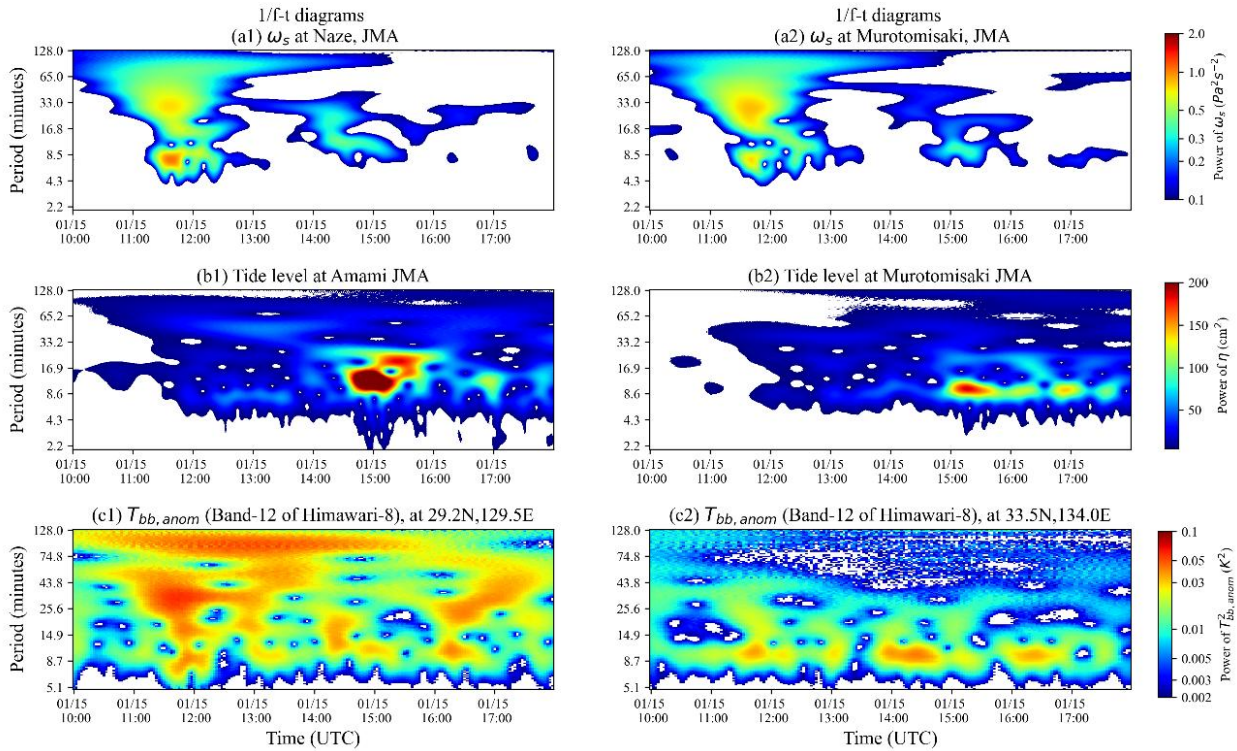


図6 名瀬(左), 室戸岬(右)における地上気圧(上図), 潮位(中図), 赤外輝度温度(下図)の連続ウェーブレット解析

4. まとめと議論

今回の解析結果から, フルディスク観測では捉えることができなかった周期 10 分程度の内部重力波が可視化された. しかし, ノイズの影響を受け, 明瞭に捉えることのできない領域が存在し, ノイズを完全に除去することができるのならすべてのバンドで Pekeris 波と内部重力波をとらえることは可能かもしれない. そのためバンドパスフィルタのかけ方などは改善の余地があると考え.

この内部重力波は速度 200 m/s 程度の速度で日本南海の太平洋上を伝播することで Proudman 共鳴によって波が増幅したと考えられる. 港湾内の固有振動周期と一致した気象津波はより増幅し, 潜水効果も加わり, 西日本で船舶の被害が発生するほどの津波に発達したとされる.

地上付近に対応している Bnad-13 と地上気圧の波形がよく対応しており, 衛星観測で気圧変化をとらえることに成功した. 以上から衛星観測には, これまで静止気象衛星を用いて研究されていない山岳波をはじめとする大気波動を鉛直, 水平方向に詳細に解析することができる可能性がある.

参考文献

- [1] Otsuka, S. (2022) Visualizing lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8, *Geophys. Res. Lett.*, 49(8) 1-9.
- [2] Watanabe, S., Hamilton, K., Sakazaki, T., and Nakano, M.(2022) First detection of the Pekeris internal global atmospheric resonance: evidence from 2022 Tonga eruption and from Global reanalysis data, *J. Atmos. Sci.*, 3027-3043
- [3] Andrews, D.G, Holton, J.R., and Loey, C.B. (1987) *Middle Atmosphere Dynamics*, International Geophysics Series vol. 40, Academic Press, 489 p.
- [4] Ishizaki, H., Sakazaki, T., and Ishioka, K. (2023) Estimation of the Equivalent Depth of the Pekeris Mode Using Reanalysis Data. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 101(6), 461-469, 2023.