

ペケリスモード (Pekeris mode)

渡 辺 真 吾*

ペケリスモード (Pekeris mode) とは, Chaim L. Pekeris 博士が1937年ごろに理論的に導き出した地球大気自由振動モードの一つである (Pekeris 1937). よく知られているラムモード (Lamb mode) に比べて地上気圧の振幅が小さく, 目立たない存在であったため, 2022年1月15日に生じたフンガ・トンガ=フンガ・ハアパイ (Hunga Tonga-Hunga Ha'apai) 火山 (以下, HTHH 火山) の強烈な噴火で引き起こされた成層圏の密度変化が気象衛星「ひまわり8号」で観測されて, 初めてその実在が確認された (Watanabe *et al.* 2022). ラムモードとともに海面との相互作用を通じて気象津波を引き起こしたことでニュースになった.

「地球を覆う大気はバイオリンの弦や太鼓の皮のように一定の周波数で共鳴するだろうか?」これは気象力学において最も基礎的な問いの一つであり, 現代では「古典論」と呼ばれる数学的体系がラプラス (Pierre-Simon Laplace) によって築かれたのは, 18世紀の終わり頃だった.

ラプラスの古典論のうち, 存在し得る解の一つがラムモードだった. ラムモードは鉛直速度成分がゼロのモードであり, 重力波やロスビー波など, 広い周波数域の解を含む. その中で, (高周波数極限においては) 地面と水平に, 音速に近い速さで遠方まで伝わる粗密波 (波の進行方向の先端部で大気が圧縮されて高圧になる) の性質を持つものをラム波といい, 1883年のクラカタウ (Krakatau) 火山の大噴火のあとに世界各地の気圧計データが収集・解析されたことによって, その存在が初めて確認された. 同様の気圧パルスは, 1907年のツングースカ隕石の大爆発や後年の核実験の

あとにもしばしば観測され, ラム波は核実験の監視という目的のためにも世界中で観測され続けてきた. ラプラスの古典論は, もともとと一様な深さを持つ海洋の自由振動を対象としていた. これを大気に適用する場合には, 海洋の深さと等価な意味を持つ深さの大気を考察することに相当し, この大気の仮想的な深さを等価深度という. ラムモードは等価深度約10kmのモードであり, 鉛直方向に伝播しない外部波モードである.

その後, 1937年にペケリス博士が論文の中で, ラムモードの他にもう一つ, ラムモードに比べて小さな等価深度を持ち, 数割程度遅い速さで水平方向に伝わる地球大気自由振動モードがあり得ることを理論的に導き出した. このペケリスモードは, 鉛直方向に位相が変わらない外部波型のラムモードとは異なり, 下部成層圏を境に上下で位相が 180° 変わる特徴があり, 対流圏界面と中間圏界面の二つの温度の極小の間にエネルギーが閉じ込められるため上部成層圏で大きな振幅を持つ内部波モードである. この性質に関連して, 成層圏の輝度温度に高い感度を持つ「ひまわり8号」の $9.6\mu\text{m}$ チャンネルに着目したことが, ペケリスモードの実在の確認につながった. HTHH後の観測によれば, 成層圏ではラムモードとペケリスモードの輝度温度のシグナルは同程度とみなせるが, 地上気圧におけるペケリスモードのシグナルはラムモードに比べて1桁小さかった. そうした性質のために, これまで実在が確認されなかったものと考えられる.

1937年の時点では大気鉛直温度構造が十分に明らかになっていなかったため, さらにその後, より現実的な温度プロファイルを用いたペケリスモードの計算が繰り返され, いくつか異なる等価深度が求められたが, HTHH 噴火の際にラムモードと一緒に火山から同心円状に広がったペケリスモードの位相速度は全方位平均で約 245ms^{-1} だった. これは等価深度約6.1kmに

* 海洋研究開発機構.

wnabe@jamstec.go.jp

© 2024 日本気象学会

相当する。なお最新の理論研究によれば、ペケリスモードの等価深度は6.5kmとされている (Ishioka 2023)。

HTHH 噴火のラムモードとペケリスモードのシグナルは、「ひまわり 8 号」だけではなく、世界各地の気圧計、微気圧計や、海底水圧計によって観測された。日本付近では、ラムモードにともなう約 2 hPa の気圧上昇が観測されてから約 2 時間後にペケリスモードにともなう約 0.1~0.2hPa の気圧低下が観測された。

地表から下部熱圏までを含む高解像度大気大循環モデルを用いたシミュレーション (動画: <https://youtu.be/kUmYHULXa2Y>) により、両モードの鉛直構造や地上気圧変化が再現され、そのデータを高解像度海洋大循環モデルに入力して計算した結果、HTHH 噴火後に日本で観測された海面変動は両モードがそれぞれ引き起こした気象津波であることが示唆された。とくに HTHH から日本への経路上にある北西太平洋海盆の深さが、ペケリスモードの等価深度に近いことから、プラウドマン共鳴による海面変位の増幅が効率よく行われたことにより、ラムモードに比べてわずかなペケリスモードの海面気圧変化が、ラムモードが強制した海面変動と同等の大きさの海面変動をもたらしたことは、防災上重要な示唆を与えた (Suzuki *et al.* 2023)。

なお、HTHH 噴火後に改めて 67 年間におよぶ再解析データの 1 時間間隔の地上気圧データを丁寧に解析し

直したところ、ラムモードと並んでペケリスモードに相当する地上気圧変動のシグナルが見いだされた。これは、ラムモードやペケリスモードは HTHH 噴火のようなイベント時に限って生じるものではなく、常日頃から存在している自由振動モードであることを意味する (Sakazaki and Hamilton 2020)。

参 考 文 献

- Ishioka, K., 2023: What is the equivalent depth of the Pekeris mode? *J. Meteor. Soc. Japan*, **101**, 139-148, doi:10.2151/jmsj.2023-008.
- Pekeris, C. L., 1937: Atmospheric oscillations. *Proc. Roy. Soc. London*, **158A**, 650-671, doi:10.1098/rspa.1937.0046.
- Sakazaki, T. and K. Hamilton, 2020: An array of ringing global free modes discovered in tropical surface pressure data. *J. Atmos. Sci.*, **77**, 2519-2539, doi:10.1175/JAS-D-20-0053.1.
- Suzuki, T., M. Nakano, S. Watanabe, H. Tatebe and Y. Takano, 2023: Mechanism of a meteorological tsunami reaching the Japanese coast caused by Lamb and Pekeris waves generated by the 2022 Tonga eruption. *Ocean Modell.*, **181**, doi:10.1016/j.ocemod.2022.102153.
- Watanabe, S., K. Hamilton, T. Sakazaki and M. Nakano, 2022: First detection of the Pekeris internal global atmospheric resonance: Evidence from the 2022 Tonga eruption and from global reanalysis data. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 3027-3043, doi:10.1175/JAS-D-22-0078.1.