

# 海底火山噴火による空振現象の基礎的挙動の観察と津波伝播時間への影響

水圏防災工学研究室 別宮 崇嗣

指導教員 細山田 得三

## 1. はじめに

2022年1月に発生したフンガ・トンガ＝フンガ・ハアパイ火山の噴火は、噴火に伴う気圧波（空振）が世界規模で観測されるとともに、通常地震津波の予測時刻よりも数時間早く到達する異常な潮位変動を引き起こした。日本国内においても、気象庁の当初の予測を大幅に上回る速さで第一波が到達し、そのメカニズムの解明は防災上の急務となっている<sup>1)</sup>。

この先行して到達する水面変動の要因として、大気中を伝播する空振が海洋波動と共鳴し、エネルギーが転移・増幅される「プラウドマン共鳴」が指摘されている。しかし、火山噴火による複雑な気圧変化と地形効果が、実際の津波伝播時間にどの程度の精度で影響を及ぼすかについては、依然として数値計算上の課題が残されている。

本研究では、1次元数値シミュレーションを用いて、火山噴火に伴う空振と海洋波動の相互作用をモデル化し、プラウドマン共鳴による増幅プロセスおよび到達時間の先行現象を再現することを目的とする。具体的には、実地形データに基づき、日本国内の主要地点における観測データとの比較検証を行う。

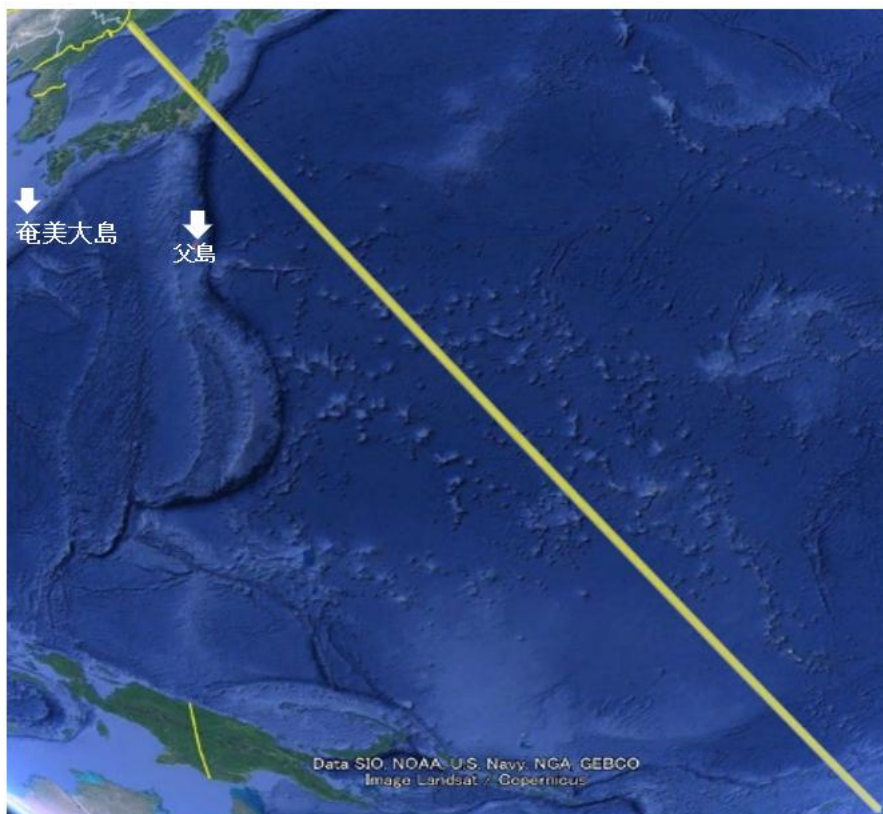


図1 トンガから東京を通過する円周線(黄線)と奄美大島と父島

## 2. 計算条件の設定

### 2.1 基礎方程式

本研究では、火山噴火に伴う空振と海洋波動の相互作用をモデル化するため、大気と海洋の結合計算を行った。

大気場については、断面 2 次元の圧縮性流体の支配方程式を用いた。重力加速度を考慮し、衝撃波や音波の伝播を再現可能な基礎式を適用した<sup>2)3)4)5)</sup>。

一方、水面変動の計算には、1 次元非線形長波方程式を用いた。大気計算によって得られた海面更生気圧を外部強制力として水面に与えることで、空振による海洋波動の励起およびプラウドマン共鳴のプロセスをモデル化した。

### 2.2 計算領域および地形条件

計算領域は、フンガ・トンガ＝フンガ・ハアパイ火山の火口から、日本国内の主要観測地点（父島、奄美、東京）を結ぶ大円経路上の断面とした。地形データには 5 分格子の水深データ（ETOPO5）を使用し、実際の海底地形を抽出して計算格子に割り当てた。

### 2.3 大気構造と初期条件

水平方向に一様な初期大気場を構築するため、「US 標準大気」を採用した<sup>6)</sup>。高度 60km までの気温・気圧の鉛直分布を考慮し、高度に応じた音速の変化が適切に表現されるよう設定した。

火山噴火の外部強制力としては、火口付近に対応する計算領域端部において、噴出流速を時間的に変化させて与えた。

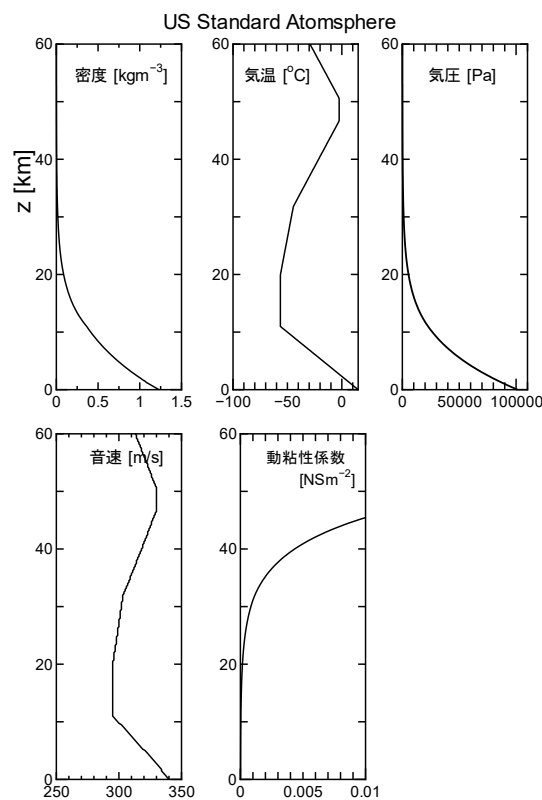


図2 本モデルで採用した鉛直大気モデル

### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 模擬空振による挙動の確認

大気変動による水面変動の挙動を観察するため、5000m,8000m,10000m,12000m,13000m の一様水深で計算を行った。図 3 がその結果である。水平方向に長さ 500km の一様水深を持つ海域の上を模擬空振を発生させ、水面変動の波形の空間分布の時間変化を示している。左段には圧力波形が半波長正弦波

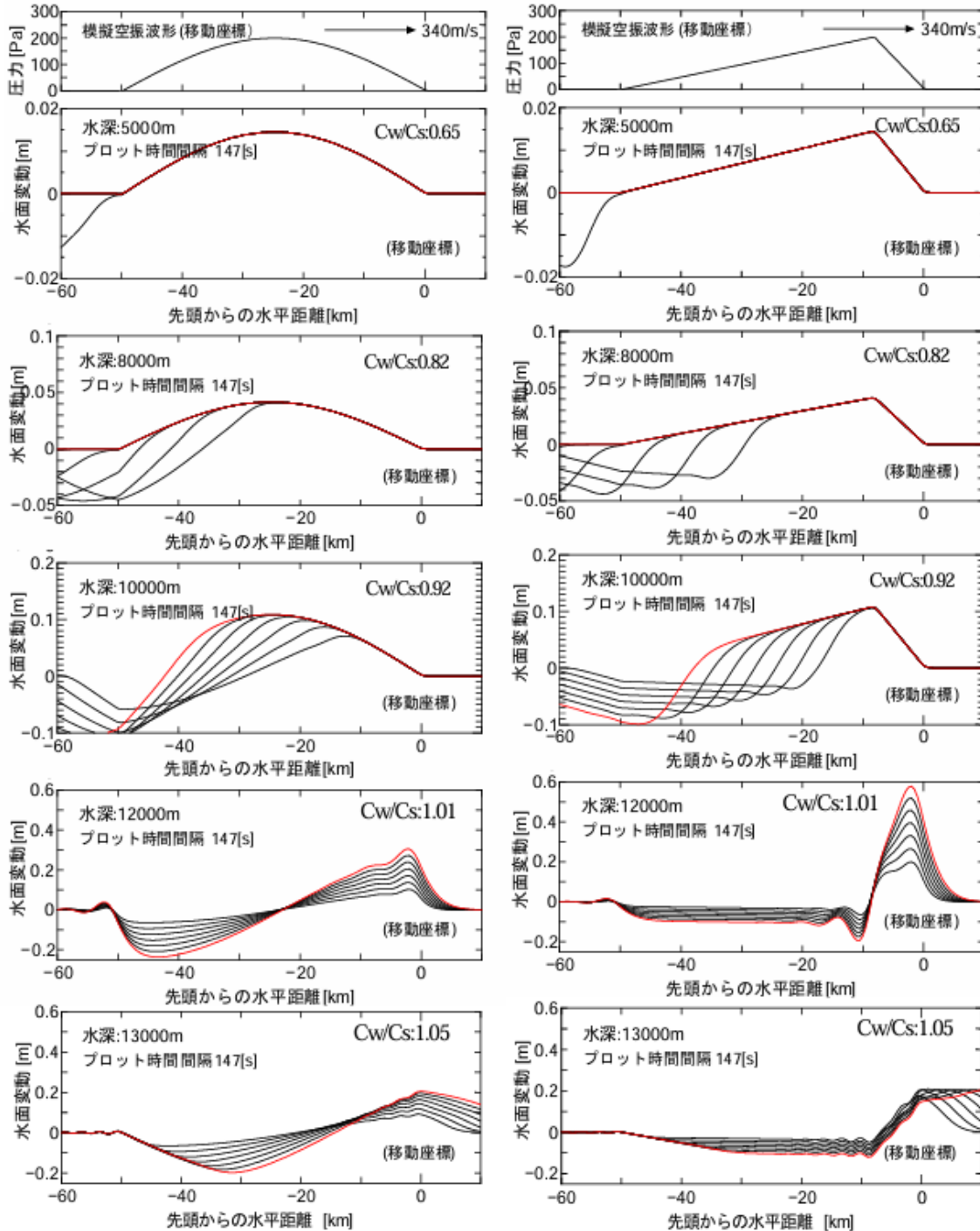


図 3 音速で移動する座標からみた水面変動の空間分布とその時間変化（小領域）  
左段：圧力波形（半波長正弦波），右段：圧力波形（歪対称型）

の場合、右段はその波形が前傾した急激で直線的な圧力上昇と緩やかな下降（歪対称）を模擬している。いずれも圧力変動の最大値は 2hPa である。最上段はそのようにして発生させた模擬空振動波形であり、その下にはそれぞれに対する水深が各条件の場合の水面変動の波形の空間分布の時間変化を示す。図に示した  $x=0$  の位置は音速で移動しており、その移動座標からみた  $x=10\sim-60\text{km}$  の水面変動の空間分布を示している。そのため模擬圧力波形は時間的に変化しない。  $C_w/C_s$  は音速と波速の比である。

水深 12,000m では波速と音速がほぼ同じとなり、水面変動に対して圧力変動がそれを助長する一定の外力を与え続けるため水面変動が増幅する。これがプラウドマン共鳴の物理的実体を示していると考えられる。正弦波の波形を持つ場合（左段）と歪対称な波形を持つ場合（右段）では波の増幅が異なり後者の方がかなり大きくなっている。圧力変動の先端( $x=0$ )での圧力勾配が水面変動の増幅に影響を与えていることが推察される。

### 3.2 トンガ火山噴火の再現計算

日本沿岸の 3 地点（東京、奄美、父島）を対象に、実地形データ（ETOPO5）を用いた再現計算を行った。噴火口から日本近傍を經由しウラジオストクに至る大円経路における水深分布を抽出した結果が図 4 である。これをみると経路上の波速音速比（ $C_w/C_s$ ）は最大で約 0.8 に達しており、プラウドマン共鳴が発生しやすく水面変動が増幅されやすい条件を備えていたことが確認された<sup>7)</sup>。

本モデルによる第一波の到達時刻は、従来の地震津波に基づく気象庁の予測時刻よりも大幅に実測値に近く、空振の影響を考慮することの有効性が示された。

計算の結果、以下の 2 つの異なる波の特性が明確に再現された。

- 1) 第一波：音速に近い速度で伝播する、周期が短く振幅の小さい水面変動。これは大気中の空振が海洋波動と共鳴するプラウドマン共鳴に起因するものであり、気象庁の従来の長波理論に基づく予測時刻よりも大幅に早く到達する挙動を再現した。
- 2) 第二波：第一波の数時間後に到達する、周期が長く振幅の大きい変動。これは火口近傍における急激な地殻変動や噴火活動そのものによって直接励起された長波としての津波。

各地点における到達時刻を実測値および気象庁の初期予測と比較した結果、本モデルによる計算値は実測値に近い精度を示した。これにより、先行して到達する異常な潮位変動を予測するためには、大気波動による物理プロセスを考慮することが不可欠であることが示された。

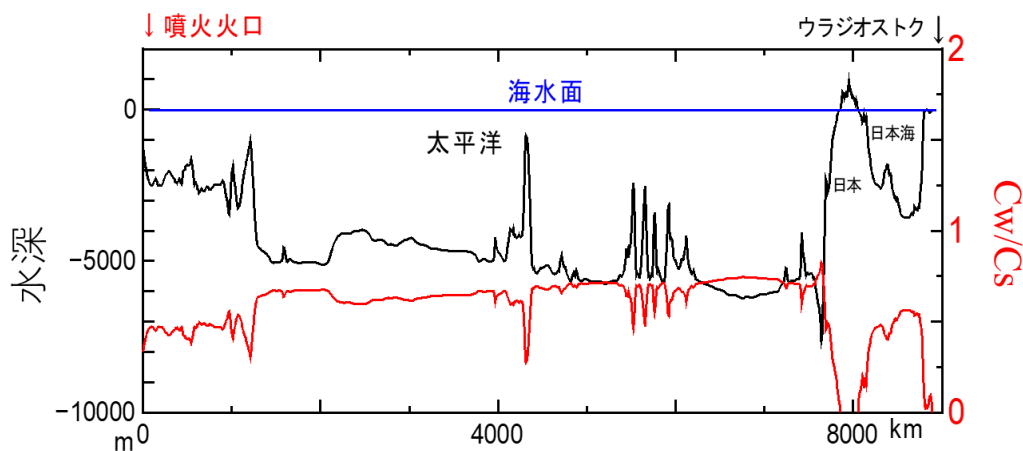


図 4 噴火口からウラジオストクを結んだ海域地形、および波速と音速の比

表 1 観測データ, 計算値, 気象庁による予測時刻の比較

地点	観測データ			構築モデル			気象庁予測 (水面変動)
	気圧動揺	水面変動(第一波)	水面変動(第二波)	気圧動揺	水面変動(第一波)	水面変動(第二波)	
東京	20:20	21:40	22:30	19:51	19:59	23:37	3:20
奄美	20:35	20:50	23:40	20:12	20:26	0:24	0:40
父島	19:40	20:20	22:30	19:16	19:20	23:24	22:40

### 3.3 到達時刻の評価

気象庁による予測値, 観測された実測値, および本モデルによる再現計算値の3点を比較し, 表1にまとめた<sup>8)</sup>. 父島, 奄美大島, 東京の各地点において, 本モデルによる第一波の到達時刻は実測値と近い値を示した. 具体的には, 従来の地震津波を想定した予報値では, トンガから日本近海までの伝播に約10時間から13時間を要するとされていたが, 実際にはそれよりも2時間から4時間程度早く第一波が観測されている. 本モデルはこの「先行する第一波」の到達を分単位の精度で再現することに成功した. 一方で, 第二波以降の振幅や到達時刻については, 火口付近の複雑な地形変化や気圧変動の継続時間に依存するため, 第一波ほどの完全な一致には至らなかったものの, 全体の傾向としては整合する結果が得られた. 以上の結果は, 大規模な火山噴火に際しては, 従来の地震津波予測モデルのみでは到達時刻を大幅に見誤る危険性があることを示唆しており, 空振の影響を考慮した本手法の気象防災業務への導入の重要性が裏付けられた.

### 4. 結論

本研究により, トンガ火山噴火で見られた先行的な潮位変動が, 空振によるプラウドマン共鳴に起因するものであることを物理的に説明した. 構築した大気・海洋結合モデルは, 複雑な地形効果を含めた水位増幅プロセスを良好に再現しており, 将来の火山噴火に伴う津波予測の精度向上に寄与する知見を得ることができた. 今後は, 実際の気象場を動的に反映させることで, さらなる予測精度の精緻化を図る必要がある.

### 参考文献

- 1) 気象庁 地震火山部, 第19回津波予測技術に関する勉強会, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingika/jishin/tsunami/benkyokai19/index.html>, 2026/1/28.
- 2) 栗原宣夫: 大気力学入門 第4章 音波の除去, 岩波全書,
- 3) 平尾雅彦: 音と波の力学 第4章 気体中の音波, 岩波書
- 4) Horace Lamb: Hydrodynamics 6th edition, chapter 10 Waves of expansion, Cambridge university press, pp. 476-561, 2010.
- 5) 北井芳典, 泉宮尊司, 石橋邦彦: 気象および津波による大気重力波の発生・伝搬特性に関する研究, 土木学会 論文集 B3(海洋開発), Vol.71, No.2, I\_389-I\_394, 2015.
- 6) NASA: U.S. standard atmosphere, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770009539>, 1976.
- 7) フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火により発生した潮位変化に関する報告書, [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/jishin/tsunami/tongahoukokusho/houkoku\\_honbun.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/jishin/tsunami/tongahoukokusho/houkoku_honbun.pdf), 2026/1/28.
- 8) フンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山の噴火で観測された気圧, 潮位辺について, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/study-panel/tsunami/benkyokai19/shiryoku3-1.pdf>, 2026/1/28.