

# 薩摩硫黄島における低周波数のピークを有する サイト増幅特性の要因分析

山田 雅行<sup>1</sup>・伊藤 佳洋<sup>2</sup>・長尾 毅<sup>3</sup>・野津 厚<sup>4</sup>・長坂 陽介<sup>5</sup>・大岩根 尚<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)  
E-mail: yamadams@newjec.co.jp

<sup>2</sup>正会員 (株)ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)  
E-mail: itoys@newjec.co.jp

<sup>3</sup>正会員 神戸大学 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 (国研)港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)  
E-mail: nozu@pari.go.jp

<sup>5</sup>正会員 (国研)港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)  
E-mail: nagasaka-y@pari.go.jp

<sup>6</sup>非会員 鹿児島県三島村 (〒892-0821 鹿児島市名山町12-18)  
E-mail: oiwane@mishimamura.jp

比較的小さな盆地構造(カルデラ)を有する薩摩硫黄島において、臨時地震観測によってサイト増幅特性の算定を行い、一方で、常時微動観測(単点H/Vおよびアレイ観測)を行い、地盤モデルの推定を行った。硫黄島港および薩摩硫黄島飛行場において算定したサイト増幅特性と、常時微動に基づく地盤モデルに対して次元重複反射を用いて算定した伝達関数の比較を行った。港湾および飛行場の伝達関数は、0.2~0.3Hz付近にピークは見られるものの、それほど明瞭なピークは見られず、サイト増幅特性には盆地構造による3次元的な効果や、地震波の入射方向の効果が含まれているものと考えられる。また、港湾と飛行場のサイト増幅特性の0.2~0.3Hz付近の共通の特徴から、両地点は深い構造を共有していると推察され、実際のカルデラ構造が従来の解釈より複雑である可能性が示唆された。

**Key Words :** *Satsuma-Iwojima Island, microtremor, earthquake observation, site amplification factor*

## 1. はじめに

地震動は、震源特性、伝播経路特性、浅部・深部地盤による地震動増幅特性に依存することが知られている。土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)<sup>1)</sup>等に述べられているように、構造物の設計のための地震動の評価においても、これらの諸特性を考慮することが幅広く行われる傾向にある。港湾や空港の構造物の設計入力地震動の作成においては、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性(周波数ごとの応答倍率)を考慮した統計的グリーン関数法が標準的に用いられている<sup>2)</sup>。

このサイト増幅特性は、深い複雑な地盤構造により、1次元の水平成層構造で説明できない特徴を持つ場合が見られる。著者らは、関東平野のような深い堆積構造を

有するサイトにおけるサイト増幅特性は、1Hz以下の周波数帯域で明瞭なピークを有さないことを明らかにしている<sup>3)</sup>。また、大阪平野のような深く大きな盆地構造におけるサイト増幅特性は、2次元有限要素解析において盆地構造に対する斜め入射の角度を考慮することで概ね再現できることを示した<sup>4)</sup>。さらに、宮城県鬼首地域を対象に、規模の小さな盆地構造(カルデラ)におけるサイト増幅特性について、2次元地震応答解析結果との比較を行い、入射方向、詳細な地盤構造、浅部地盤の影響により生じるバラツキを勘案すれば、地震応答解析結果からサイト増幅特性を説明できることを明らかにした<sup>5)</sup>。

本研究では、比較的小さな盆地構造(カルデラ)を有する薩摩硫黄島に着目し、そのサイト増幅特性について検討を行った。薩摩硫黄島では、港湾の西側にカルデラ壁



図-1 薩摩硫黄島の位置(国土地理院, 電子国土 Web<sup>9)</sup>に加筆)

と見られる崖が存在しており、飛行場は外輪山上、港湾はカルデラ内であると考えられている<sup>78)</sup>。このような地盤構造の違いは、港湾と飛行場におけるサイト増幅特性に大きく影響していると考えられ、これを明らかにすることは、防災上の重要性を有する。また、サイト増幅特性と地盤構造は密接に関係しているため、これを明らかにすることは、カルデラ構造解明の一助ともなるはずである。

そこで本研究では、薩摩硫黄島の港湾と飛行場において、臨時地震観測によってサイト増幅特性の算定を行い、一方で、常時微動観測(単点H/Vおよびアレイ観測)を行い、地盤モデルの推定を行った。硫黄島港および薩摩硫黄島飛行場において算定したサイト増幅特性と常時微動に基づく地盤モデルに対して一次元重複反射を用いて算定した伝達関数の比較を行い、低周波数のピークを有するサイト増幅特性の要因分析を行った。

## 2. 薩摩硫黄島

薩摩硫黄島は、薩摩半島南端から南南西に40~50kmの位置にある竹島・硫黄島・黒島の三島および昭和硫黄島などの岩礁から成る三島村の中の1つの島である。小笠原諸島の硫黄島と区別するために薩摩硫黄島と“薩摩”をつけて呼ばれることが多い(図-1)。また、薩摩硫黄島は、平安時代の僧、俊寛が流刑に処せられた鬼界ヶ島とされており、島内には黒木御所跡や俊寛の居住跡とされる俊寛堂が遺されている。

鬼界カルデラと呼ばれる東西22km、南北17kmのカルデラは、新・旧二重のカルデラからなっており、古期カルデラは9万5000年前、新期カルデラは7,300年前に形成されたと推定されている。薩摩硫黄島および竹島はカルデラ北縁の陸上部分で、鬼界カルデラの外輪山に相当するとされる(図-2)。

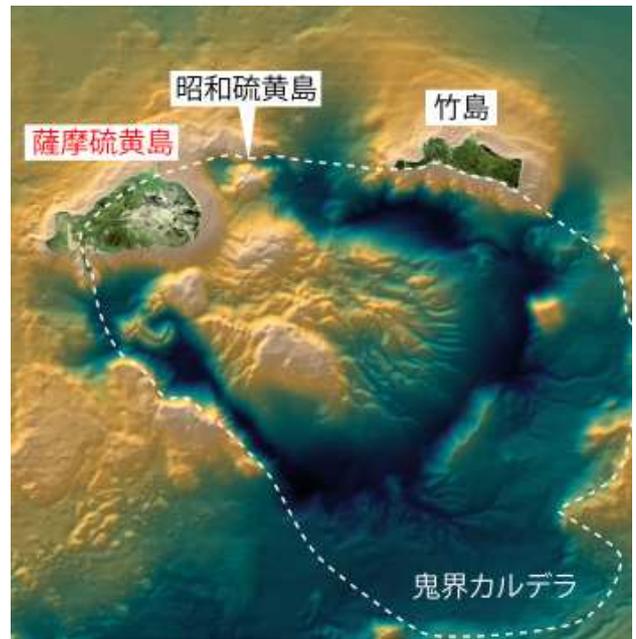


図-2 鬼界カルデラ



図-3 薩摩硫黄島の鳥瞰図(鹿児島県三島村 HP より引用<sup>7)</sup>)



図-4 硫黄島港と硫黄岳

薩摩硫黄島は、周囲19.1km、面積：11.74km<sup>2</sup>、人口：128人であり<sup>10)</sup>、港や空港のある島の西部に生活圏は集中している。島の東部には、カルデラ形成後の成層火山である標高704mの硫黄岳が聳えている。島の東方2km

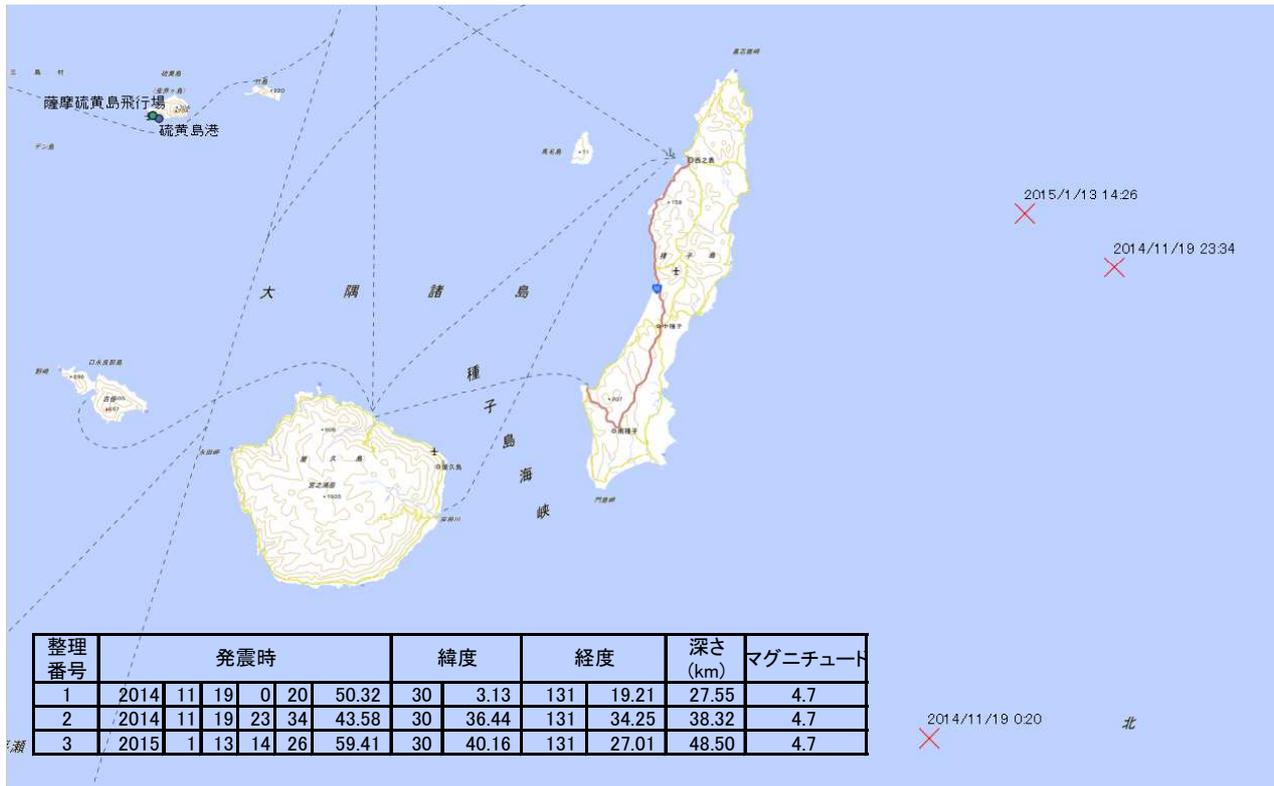


図5 地震観測点と観測された地震の震央(×)(国土地理院, 電子国土 Web<sup>9)</sup>に加筆)

沖では、1934年～1935年の海底火山活動によって昭和硫黄島が出現した(図-2, 3)。活発な火山活動の影響によって、島内には多くの温泉が湧出するだけでなく、硫黄島港では海水がオレンジ色に変色している(図-4)。

### 3. 硫黄島港と薩摩硫黄島飛行場における地震観測

硫黄島港(以下、「港湾」と略す)と薩摩硫黄島飛行場(以下、「飛行場」と略す)において、2014年9月から臨時地震観測を実施している。観測には、センサが日本航空電子工業(株)製JA-40GA04、収録器が白山工業(株)LS-8800を使用した。

現在までに、図-5に震央図と一覧表を示す3地震が観測された。港湾および飛行場における2014/11/19 23:34の地震の時刻歴波形を図-6に示す。港湾の時刻歴波形は、飛行場に比べて、振幅が大きく、継続時間が長い傾向が見られる。

### 4. 硫黄島港と薩摩硫黄島飛行場におけるサイト増幅特性

図-5に示した地震については、種子島、屋久島、薩摩半島および大隈半島におけるK-NET, KiK-net<sup>11)</sup>との同時

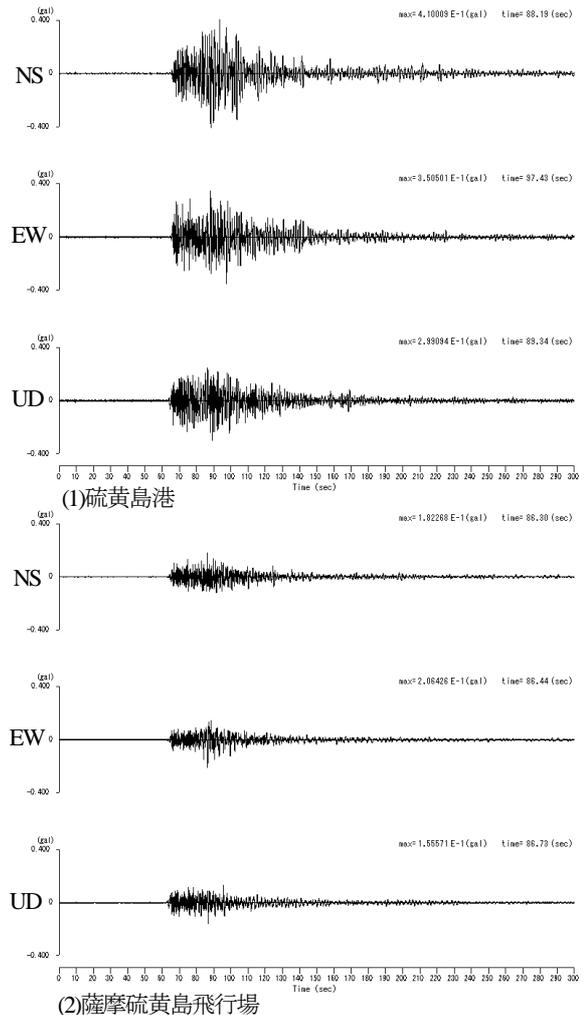


図-6 時刻歴波形(2014/11/19 23:34)

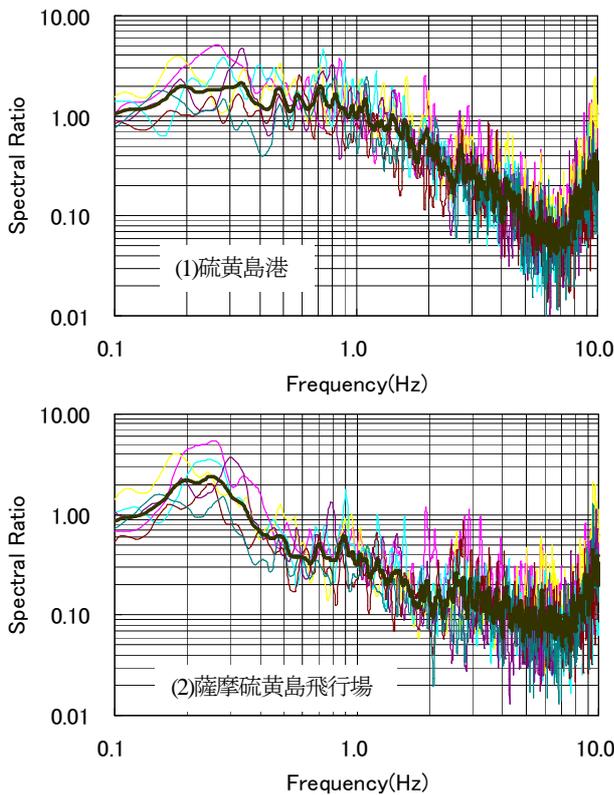


図-7 スペクトル比

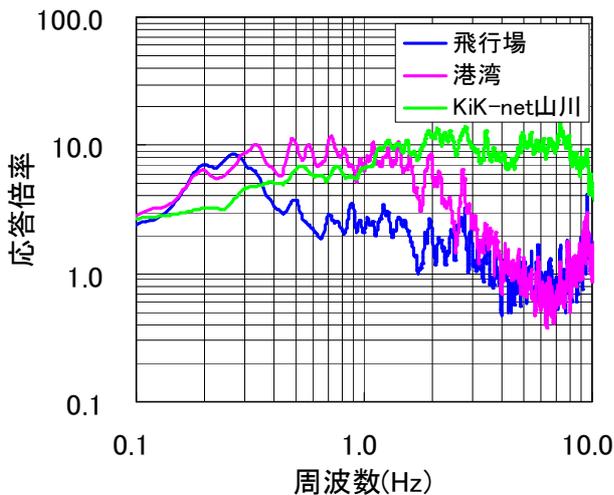


図-8 サイト増幅特性

記録が得られている。K-NET, KiK-netにおいてはすでにサイト増幅特性<sup>12)</sup>(地震基盤～地表相当)が得られていることから、同時記録のフーリエスペクトル比を利用して、港湾と飛行場におけるサイト増幅特性の算定を行った。ここでは、震源距離が近いと考えられるKiK-net山川(KGSH10) (図-1に位置を示す)との同時記録によってサイト増幅特性を算定した。

図-7に、それぞれ港湾、飛行場の観測記録のフーリエスペクトルをKiK-net山川(KGSH10)の同時記録のフーリエスペクトルで除した比を示す。カラーで示した細線が個々の水平成分のフーリエスペクトル比、黒の太線がそれらの対数平均値である。港湾、飛行場およびKiK-net山

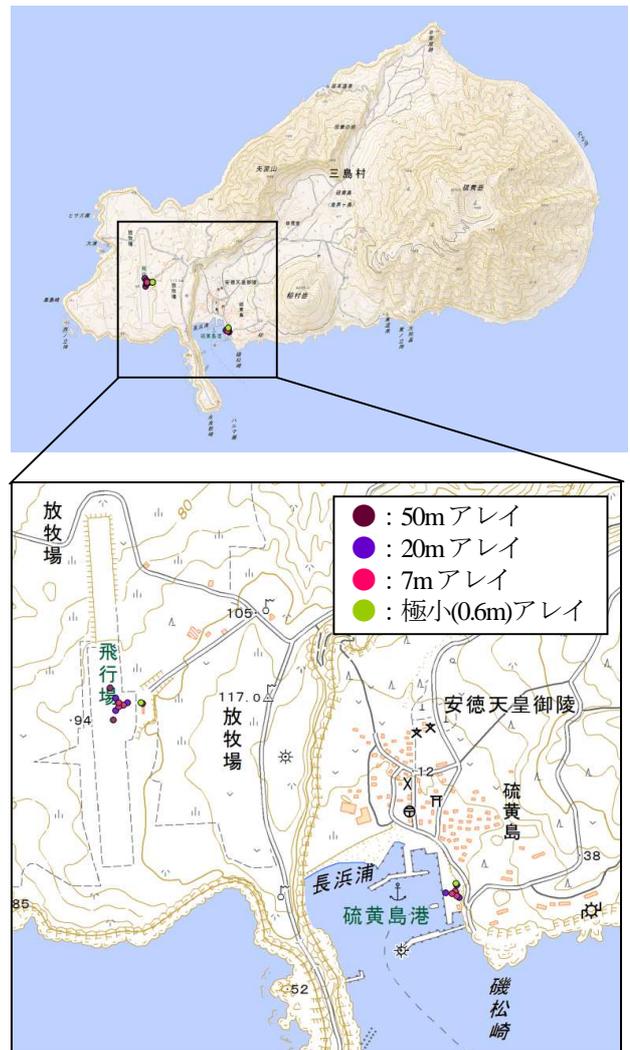


図-9 硫黄島港と薩摩硫黄島飛行場における微動観測地点(国土地理院, 電子国土 Web<sup>9)</sup>に加筆)

川の観測記録において、0.1～10Hzの範囲のS/N比が十分であることは確認している。地震、成分間のバラツキは比較的小さく、安定したスペクトル比が得られている。これらは、震源が同じで、伝播経路が比較的似ていることから、地点間のサイト増幅特性の違いを表していると考えられる。したがって、KiK-net山川(KGSH10)のサイト増幅特性に、図-7に示した港湾、飛行場のフーリエスペクトル比を乗ずることによって、港湾、飛行場のサイト増幅特性を算定することができる。

図-8に、参照元のKiK-net山川(KGSH10)および算定した港湾、飛行場のサイト増幅特性(地震基盤～地表相当)を示す。飛行場のサイト増幅特性は、0.2～0.3Hzの低周波数帯域にほぼ唯一の明瞭なピークがあるといった、他にあまり例のない特徴<sup>12)</sup>を有している。

図-8から次の二点が指摘できる。まず、一般的な土木構造物に対して影響が大きいと考えられる0.3～2.0Hz程度の帯域では、飛行場よりも港湾の方がはるかにサイト増幅特性が大きい。これはカルデラ内に堆積した軟弱な地層の影響であると解釈できる。一方、0.2～0.3Hz程度

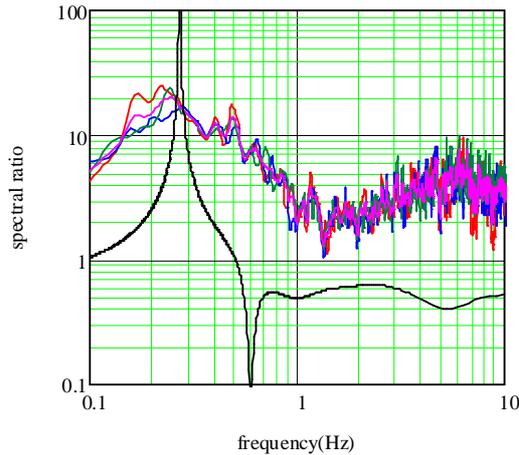
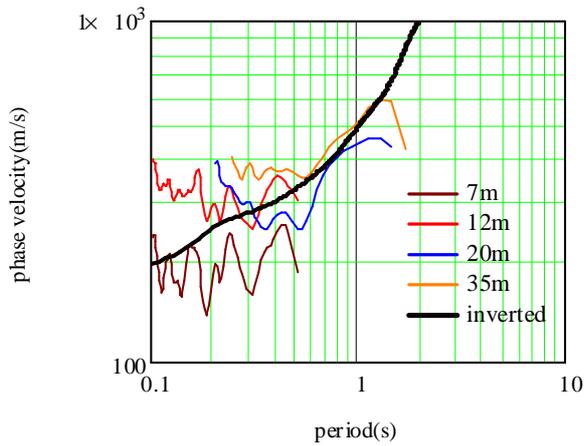


図-10 硫黄島港の位相速度とHVスペクトル

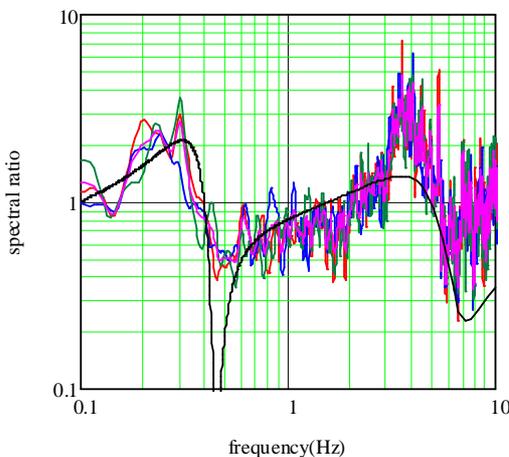
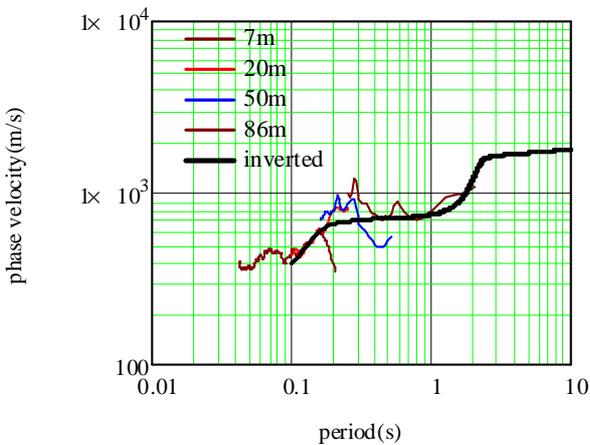


図-11 薩摩硫黄島飛行場の位相速度とHVスペクトル

の帯域では、飛行場のサイト増幅特性は港湾と同程度に大きい。これより、港湾と飛行場は、低周波側の増幅に関係する深い構造を共有していると見ることができる。一般には、図-9に示す地形や図-2のように、わずかな距離ではあるが、飛行場は外輪山上、港湾はカルデラ内であると考えられている<sup>78)</sup>。この0.2~0.3Hz付近のサイト増幅特性の特徴は、「港湾の西側に位置する崖がカルデラ壁である」とする解釈ではすべてを説明できず(ここで言う崖とは図-9下段の中央付近で等高線が密になっている部分のことである)、実際のカルデラ構造がより複雑である可能性を示唆するものと考えられる。

## 5. 硫黄島港と薩摩硫黄島飛行場における常時微動観測結果と地盤構造モデルの推定

図-9に示すように、港湾および飛行場において、微動アレイ観測を行った。

常時微動観測には、サーボ型加速度計(白山工業製JU210<sup>13)</sup>)を用いた。アレイ観測は、中心とほぼ正三角形となる円周上の頂点の4点同時観測を基本とした。港湾のアレイ半径は20m, 7m, 0.6m, 飛行場は50m, 20m, 7m, 0.6mで、各15分間の観測を行った。極小アレイ(0.6m)はCCA法<sup>14)~16)</sup>、7~50mアレイは空間自己相関(SPAC)法<sup>17)</sup>を用いて位相速度の算定を行った。SPAC法では、中心と円周上の頂点の組み合わせに加えて、円周上の頂点同士の組み合わせによっても解析を行った。

常時微動HVスペクトルの算出においては、長周期の波動成分の影響も考慮できるように、各観測地点について擾乱の少ない163.84秒間のデータを3区間抽出し、その平均値としている。水平成分は直交する2成分の二乗平均の平方根とした。スペクトルの平滑化については、長周期においてもピークを明瞭に判別できるようにする観点から水平成分、鉛直成分ともに0.05HzのParzenウィンドウを用いている。

図-10、図-11にそれぞれ港湾と飛行場における、位相速度の分散曲線とHVスペクトルを示す。

港湾において、極小アレイの結果から最表層のS波速度を200m/sとして、推定した地盤構造モデルを表-1に示す。港湾では、各アレイから得られる位相速度の分散曲線にバラツキが見られたが、図-10に黒線で併記した理論分散曲線は概ね観測に対応する傾向を示した。また、理論HVスペクトルのピーク周波数も観測と良く一致している。HVスペクトルの形状が一致しないのは、カルデラの端部付近であることから地盤の傾斜が考えられることや、観測記録に存在したモーターのようなノイズが原因である可能性も考えられる。

飛行場において、極小アレイの結果から最表層を

表-1 硫黄島港の地盤構造モデル

	$\rho(t/m^3)$	$V_s(m/s)$	$V_p(m/s)$	H(m)
1	1.8	200.0	1000.0	15.0
2	1.9	300.0	1700.0	50.0
3	2.0	400.0	2000.0	95.0
4	2.1	600.0	2400.0	200.0
5	2.1	800.0	2800.0	250.0
6	2.1	1200.0	3100.0	100.0
7	2.2	2000.0	4400.0	

表-2 薩摩硫黄島飛行場の地盤構造モデル

	$\rho(t/m^3)$	$V_s(m/s)$	$V_p(m/s)$	H(m)
1	1.9	300.0	1700.0	10.0
2	2.0	400.0	2000.0	10.0
3	2.1	600.0	2400.0	20.0
4	2.1	800.0	2800.0	550.0
5	2.1	1200.0	3100.0	350.0
6	2.2	2000.0	4400.0	

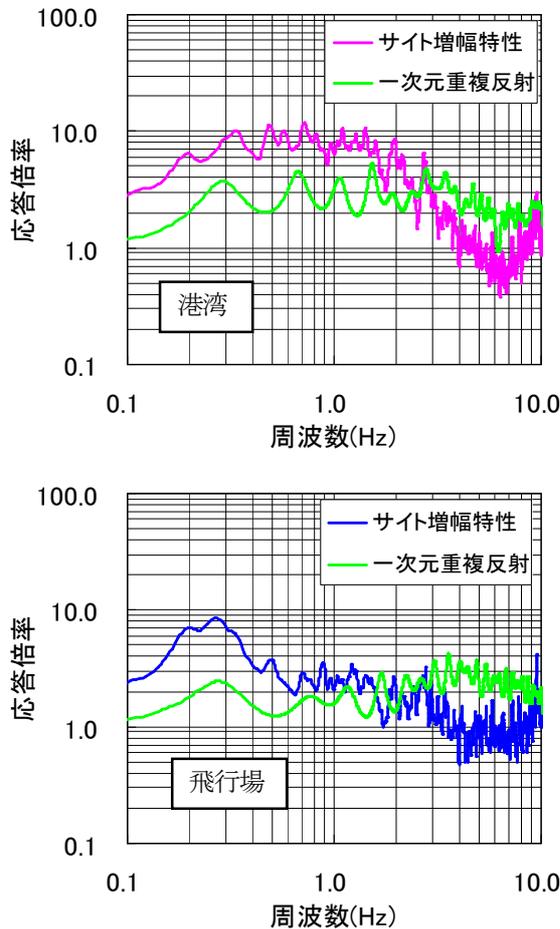


図-12 サイト増幅特性と一次元重複反射による伝達関数の比較

$V_s=300m/s$ として、推定した地盤構造モデルを表-2に示す。飛行場では、位相速度の分散曲線とH/Vスペクトルにおいて、観測値と理論値に良好な対応が見られた。

鬼界カルデラの外輪山上と考えられる飛行場は、 $V_s=800m/s$ の層の上端まで40mと推定されたのに比べて、港湾では300mを超える深さに推定され、カルデラ内外

とされる港湾と飛行場の地盤条件の違いが検出できた。

## 6. サイト増幅特性と一次元重複反射による伝達関数の比較

図-12に、港湾および飛行場において、地震観測記録から算定されたサイト増幅特性と微動アレイ観測に基づく地盤モデルに対して一次元重複反射を用いて算定した伝達関数の比較を示す。なお、減衰定数はJ-SHIS 地震ハザードステーション<sup>18)</sup>により公開された深部地盤モデルの物性値を参考に設定した。

港湾の伝達関数は0.2~3.0Hzにおいて飛行場よりも大きい傾向を示し、両者の地盤条件の違いはここでも表れていると言える。しかしながら、港湾および飛行場の伝達関数は、0.2~0.3Hz付近にピークは見られるものの、それほど明瞭なピークは見られず、おおむねフラットな形状を示している。サイト増幅特性との比較では、港湾の伝達関数は0.2~3.0Hzの全域にわたって増幅倍率が小さく、飛行場は0.2~0.3Hz付近のピークが増幅倍率が小さい傾向を示した。

サイト増幅特性には、薩摩硫黄島の比較的小さな盆地構造(カルデラ)による3次元的な効果や、用いた地震の震源が種子島の東側に集中していることから入射方向の効果が含まれているものと考えられる。

## 7. おわりに

比較的小さな盆地構造(カルデラ)を有する薩摩硫黄島において、臨時地震観測によってサイト増幅特性の算定を行い、一方で、常時微動観測(単点H/Vおよびアレイ観測)を行い、地盤モデルの推定を行った。硫黄島港および薩摩硫黄島飛行場において算定したサイト増幅特性と常時微動に基づく地盤モデルに対して一次元重複反射を用いて算定した伝達関数の比較を行った。

港湾および飛行場の伝達関数は、0.2~0.3Hz付近にピークは見られるものの、それほど明瞭なピークは見られず、これだけではサイト増幅特性を説明できない。サイト増幅特性には、盆地構造による3次元的な効果や、地震波の入射方向の効果が含まれているものと考えられる。

また、0.2~0.3Hz程度の低周波側の帯域では、港湾と飛行場のサイト増幅特性は同程度となることから、深い構造を共有していると推察され、実際のカルデラ構造は従来の解釈より複雑である可能性が示唆された。今回得られたデータは、今後のカルデラ構造の理解において重要な意義を有すると考えられる。

謝辞：K-NET, KiK-netの強震観測記録については(国研)防災科学技術研究所のHP(<http://www.kik.bosai.go.jp>)より入手しました。本研究は、平成26年度科学研究費補助金(26420458)の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）－耐震基準作成のための手引き－，2001.
- 2) 国土交通省港湾局監修，(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 3) 長尾毅，山田雅行，野津厚，諸星一信，小林哲人，安中正：微動 H/V を用いた東京港のサイト増幅特性のグルーピング，地震工学論文集，Vol.29，pp.197-205，2007.
- 4) 長尾毅，山田雅行，野津厚：深い盆地構造におけるサイト増幅特性に対する入射角の影響に関する研究，構造工学論文集，Vol.54A，pp.247-255，2008.
- 5) 長尾毅，山田雅行，野津厚：深い盆地構造におけるサイト増幅特性の2D-FEMを用いた入射方向依存性に関する研究～大阪平野と釧路平野の検討～，応用力学論文集，Vol.12，pp.579-588，2009.
- 6) 山田雅行，長尾毅，野津厚：鬼首地域における地震動増幅の要因分析，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.4，pp. I-33-I-43，2014.
- 7) 気象庁：鬼界カルデラの海底地形・地磁気・重力について，火山噴火予知連絡会会報，Vol.103，pp.133-139，2011.
- 8) 気象庁：鬼界カルデラの地質構造について，火山噴火予知連絡会会報，Vol.111，pp.202-206，2013.
- 9) 国土地理院：電子国土 Web，<http://maps.gsi.go.jp/>.
- 10) 鹿児島県三島村：<http://mishimamura.com/tourism/394/>.
- 11) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, Jour. Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 12) 野津厚，長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，2005.
- 13) 先名重樹，安達繁樹，安藤浩，荒木恒彦，飯澤清典，藤原広行：微動探査観測システムの開発，物理探査学会学術講演会講演論文集，Vol.115，pp.227-229，2006.
- 14) Cho, I., Tada, T. and Shinozaki, Y. : A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms, Geophysics, Vol.69, pp.1535-1551, 2004.
- 15) Cho, I., Tada, T. and Shinozaki, Y. : Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, J. Geophys. Res., Vol.111, B09315, doi:10.1029/2005JB004235, 2006.
- 16) Tada, T., Cho, I., and Shinozaki, Y. : New horizons in the utility of horizontal-motion microtremors, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2010.
- 17) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., University of Tokyo, Vol.35, pp.415-456, 1957.
- 18) (研)防災科学技術研究所：J-SHIS 地震ハザードステーション，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>.

(2015.9.11 受付)

## ANALYSIS OF SITE AMPLIFICATION FACTORS WITH THE PEAK IN LOW FREQUENCY BAND IN SATSUMA-IWOJIMA ISLAND

Masayuki YAMADA, Yoshihiro ITO, Takashi NAGAO,  
Atsushi NOZU, Yosuke NAGASAKA and Hisashi OIWANE

It is known that three-dimensional shape of a caldera affects ground motions. Two sites in Satsuma-Iwojima Island are selected to investigate this; one is at the port which is considered inside the Kikai Caldera and the other is at the airport which is on the outer rim of the caldera.

First, we evaluated site amplification factors at two sites based on earthquake records that are considered to include three-dimensional effects. While the result at the port, inside the caldera, was larger at 0.3-3 Hz than at the airport, the peak around 0.2 Hz was observed at both sites. This suggests the existence of deep structure that is common to both sites.

In addition, the estimated site amplification factors and one-dimensional transfer functions that are evaluated from subsurface structure models based on microtremor array observations are compared. It is found that one-dimensional transfer functions are smaller below 3 Hz on both sites and the peak around 0.2 Hz is not clear at the airport. This is considered due to the effect of the three-dimensional nature of the caldera and the incident angle of seismic waves.